

ANA CAROLINA ELIZABETH KOLB MAZZAROTTO

Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba

Verificação computacional de desempenho comparativo com soluções convencionais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná como condição parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Aloísio Leoni Schmid

CURITIBA

2011

Mazzarotto, Ana Carolina Elizabeth Kolb

Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba: verificação computacional de desempenho comparativo com soluções convencionais / Ana Carolina Elizabeth Kolb Mazzarotto. – Curitiba, 2011.

263 f. : il., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil.

Orientador: Aloísio Leoni Schmid

1. Ventilação. 2. Fachadas. 3. Energia – Consumo. 4. Conforto térmico. I. Schmid, Aloísio Leoni. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 697.92

TERMO DE APROVAÇÃO

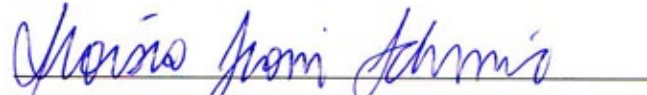
ANA CAROLINA ELIZABETH KOLB MAZZAROTTO

USO DO SISTEMA DE FACHADAS DUPLAS VENTILADAS EM EDIFÍCIOS EM CURITIBA

VERIFICAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO COMPARATIVO COM SOLUÇÕES CONVENCIONAIS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Ing. Aloisio Leoni Schmid

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR



Prof. Dr. Eng. Carlos Aurélio Nadal

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR



Prof.ª Dr.ª Marcia Peinado Alucci

Departamento de Tecnologia da Arquitetura – FAU USP

Curitiba, 09 de maio de 2011

Agradecimentos

Ao PPGCC - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, à Prof^ª. Dr^ª. Marianne R.M.N.Costa, coordenadora, e à Ziza Regina Nichele, secretária.

Ao Instituto de Engenharia do Paraná, na figura do Eng. Civil Jaime Sunye Neto.

Aos professores do PPGCC.

Aos colegas de mestrado.

Em especial, agradeço:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing. Aloísio Leoni Schmid.

Ao Professor Doutor Sergio Fernando Tavares.

Ao Professor Doutor Carlos Aurélio Nadal.

À Prof^ª. Dr^ª . Marcia Peinado Alucci.

À minha colega e amiga Sílvia Pedroso Xavier.

Aos meus pais, os professores Marelin Kolb Mazzarotto e Marco André Mazzarotto.

Aos meus irmãos, Marco André Mazzarotto Filho e Ingrid Helena Kolb Mazzarotto.

E ao meu maior incentivador e companheiro, Rafael Dal-Ri.

Resumo

A partir dos anos 1990, uma tipologia de fachada, caracterizada pela exploração da transparência do vidro na arquitetura, passou a ser intensamente utilizada na Europa, como uma estratégia de arquitetura mais sustentável. Denominado de fachada dupla ventilada, este sistema compõe-se por pelo menos duas peles, geralmente envidraçadas, posicionadas entre o espaço interno ocupável e o ambiente externo, configurando um canal para movimentação do ar. Este aspecto, a passagem intencional e controlada do ar nesta cavidade, diferencia a tecnologia das fachadas com vidro duplo ou triplo. A tecnologia baseia-se na noção de fechamentos externos com a característica de responder dinamicamente à variação das condições ambientais do local de um edifício, incorporando elementos de sombreamento integrados, ventilação natural e estratégias de isolamento térmico. As fachadas duplas ventiladas apresentam um comportamento distinto das fachadas convencionais, devido à complexidade dos processos físicos envolvidos que afetam o desempenho do edifício como um todo. Como este sistema é fortemente dependente das condições externas (como a radiação solar e temperatura externa), já que estas influenciam o clima interno, deve ser projetado considerando as particularidades de seu contexto e orientação da fachada. Para atingir objetivos como eficiência energética e conforto ambiental, seu projeto deve ser alvo de intenso planejamento e simulações para prever seu desempenho e otimizar o sistema. O objetivo desta pesquisa é analisar o desempenho térmico e energético de edifícios de escritórios com fachadas duplas ventiladas, em condição de clima subtropical, esclarecendo a sua sensibilidade em relação a variáveis de desempenho. A estratégia utilizada é experimental (simulação) e a delimitação geográfica, Curitiba. A revisão bibliográfica, prévia ao desenvolvimento do estudo, pretende fornecer subsídios para a realização das simulações, abordando os conceitos do sistema de fachadas duplas, seu comportamento físico, parâmetros de projeto e procedimentos de modelagem e simulação. A simulação apresenta resultados do regime de temperaturas internas nos ambientes, de consumo de energia para condicionamento artificial, dos processos de transferência de calor e do comportamento da ventilação natural, decorrentes do tratamento dos edifícios com o sistema de fachadas duplas ventiladas. Os modelos simulados foram denominados de A e B, e cada um foi modelado no programa de simulação com a configuração de fachada convencional ou simples (modelo base de referência para comparações) e com a adição da fachada dupla ventilada (modelo proposto). O modelo A é conceitual, e representa uma unidade de escritório de um edifício comercial de Curitiba, configurado a partir de pesquisa junto ao mercado imobiliário. Já o modelo B representa um edifício real, selecionado para aplicação da estratégia de *retrofitting* de fachada. Os resultados obtidos confirmam a hipótese do trabalho quanto ao potencial do sistema de fachada dupla ventilada, aplicada aos casos selecionados, para a melhora do desempenho térmico e energético de seus ambientes de trabalho.

Palavras-chave

Fachadas duplas ventiladas. Desempenho térmico e energético. Sistemas de fachadas. Ventilação natural. Edifícios comerciais.

Abstract

From the 1990s, a type of facade, characterized by exploiting the transparency of glass in architecture, was heavily used in Europe as a strategy for more sustainable architecture. Designated as double skin façade, this system is composed of at least two skins, usually made of glass, positioned between internal and external environment, setting up a channel for air movement. This intentional and controlled passage of air in this cavity distinguishes the technology from façades with double or triple glass layers. The technology is based on the notion of external envelopes with the characteristic of dynamically responding to varying environmental conditions, incorporating elements of integrated shading, natural ventilation and thermal insulation strategies. The double skin façades exhibit a distinct behavior from conventional facades due to the complexity of the physical processes that affect the performance of the building as a whole. Because this system is highly dependent on external conditions (such as solar transmission and outside temperature), since they influence the climate, should be designed considering the particularities of their context and orientation of the facade. To achieve goals such as energy efficiency and environmental comfort, the design should be the subject of intense planning and simulations to predict performance and optimize the system. The objective of this research is to analyze the thermal and energy performance of office buildings with double skin façades in a subtropical climate, explaining its sensitivity to performance variables. The strategy used is experimental (simulation) and the location, Curitiba. The literature review, prior to the study, aims to provide data to carry out simulations, addressing the concepts of the system of double skin façades, its physical behavior, design parameters and procedures of modeling and simulation. The simulation investigates the temperature regime in the internal environment, energy consumption for artificial conditioning, heat transfer and behavior of natural ventilation from the treatment of buildings with double skin façades. The models were designated A and B, and each was modeled in the simulation program with the configuration of conventional façade (baseline model) and with the addition of double skin façade (proposed model). The model A is conceptual, and represents a unit of office of an office building in Curitiba, configured from research within the construction market. The model B represents a real building, selected to implement the strategy of façade's retrofitting. The results confirm the working hypothesis about the potential of double skin, applied to selected cases, to improve the thermal and energy performance of their work environments.

Key words

Double skin façades. Thermal and energetic performance. Façade systems. Natural ventilation. Commercial buildings.

Lista de figuras

Figura 1.1. Uso final de energia elétrica em escritórios. FONTE: BRASIL-a, 2008.....	24
Figura 2.1. Edifício Cidade Nova. FONTE: SILVA E PAIVA, 2008	34
Figura 2.2. Os componentes da fachada dupla ventilada. As setas em vermelho indicam ar quente e as azuis ar frio.	37
Figura 2.3. Designações do sistema na literatura científica.	38
Figura 2.4. Debis Building, de 1997. FONTE: MELET, 1999.	42
Figura 2.5. The Helicon London. FONTE: James Newman. Http://www.skyscrapernews.com/picturedisplay.php?ref=4676&idi=The+Helicon&self=nse&selfidi=4676TheHelicon_pic2.jpg&no=2	52
Figura 2.6. Das Dusseldorfer Stadttor . FONTE: MEYER-BOAKE, http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/ds/twin.html	52
Figura 2.7. Telus Building - antes e depois da renovação. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003	58
Figura 2.8. Funcionamento da FDV no inverno e verão. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003. .	59
Figura 2.9. Vista do ambiente interno renovado e prateleiras de luz. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003	60
Figura 2.10. Vista externa e do interior da cavidade. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003.....	61
Figura 2.11. Corte do ambiente interno e detalhe da fachada. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003	61
Figura 2.12. Classificação por compartimentação da cavidade.....	63
Figura 2.13. RWE Tower: vista da cavidade e módulos da fachada. FONTE: BBRI, 2004....	65
Figura 2.14. Funcionamento da <i>shaft-box façade</i> , elevação e corte. FONTE: BBRI, 2004. ...	66
Figura 2.15. Aurora Place, Sydney, Austrália. FONTE: MARCONDES, 2004.	67
Figura 2.16. Avaliação dos dois tipos de fachada conforme a compartimentação.	67
Figura 2.17. As tipologias de fachadas duplas ventiladas conforme o método de ventilação utilizado. FONTE: HARRISON E MEYER-BOAKE, 2003.	68
Figura 2.18 - Occidental Chemical Building. FONTE: HARRISON e MEYER-BOAKE, 2003	69
Figura 2.19. Tjibaou Cultural Centre, de 1998, projeto do arquiteto Renzo Piano. Croqui do arquiteto e foto do edifício. FONTE: YOSHIDA, 1998.....	70
Figura 2.20. Os cinco tipos de ventilação da cavidade conforme o BBRI. FONTE: BBRI, 2004	71
Figura 2.21. Tipo especial de modo de ventilação. FONTE: BBRI, 2004.	71
Figura 2.22. Conceitos de fachadas duplas pela combinação dos três critérios de classificação. FONTE: adaptado de BBRI, 2004.....	72
Figura 2.23. Características das fachadas duplas ventiladas naturalmente. FONTE: adaptado de BBRI-2004.....	74

Figura 2.24 - Efeito chaminé na FDV. O ar aquecido no espaço intermediário torna-se menos denso e tende a sair da cavidade pelas aberturas superiores, sendo substituído pelo ar mais fresco do exterior, removendo o calor pelo fluxo do ar. FONTE: POIRAZIS. Http://www2.ebd.lth.se/ebdhome/avd_ebd/main/personal/Project_home_page/main/Energy%20and%20ind.clim.%20simul%20ofSingleSkinFacades.htm	75
Figura 2.25 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de calor, com as esquadrias abertas.	77
Figura 2.26 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de frio, com as esquadrias fechadas.	78
Figura 2.27 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de frio, com as esquadrias do fechamento interno abertas.	78
Figura 2.28. Valores previstos de velocidade do fluxo do ar na cavidade. FONTE: GAN, 2006	80
Figura 2.29. Representação do edifício estudado, com adição de fachada dupla na face orientada para sul. FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2007-a	82
Figura 2.30. Taxa de renovação do ar e da circulação do ar quando fachada dupla ensolarada está a sotavento. FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2007-a.....	83
Figura 2.31. Taxa de renovação do ar e da circulação do ar quando fachada dupla ensolarada está a barlavento. FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a.	83
Figura 2.32 - Detalhe da fachada elevada sobre o edifício, com abertura da cavidade frontal e posterior. FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a.	84
Figura 2.33 - A abertura da cavidade superior na face posterior evita a inversão do fluxo nos escritórios causada pelo vento contra a fachada. FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a.	84
Figura 2.34. Características das fachadas duplas ventiladas mecanicamente. FONTE: BBRI, 2004.	86
Figura 2.35. Esquema da transmissão de calor na fachada dupla ventilada.	87
Figura 2.36 - Transferência de calor no vidro.	88
Figura 2.37 - Exemplo de transmissão solar em um vidro duplo de baixa emissividade. FONTE: Sunguard – Manual Técnico.	89
Figura 2.38 - Transferência de calor por radiação solar na FDV . FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2006.....	91
Figura 2.39. Diagrama do modelo de transferência de calor e fluxo do ar da FDV com dispositivo de sombreamento. FONTE: SALENS, 2003.	91
Figura 2.40 - Esquema do ganho de calor pela FDV (fechamento externo, cavidade e fechamento interno), considerando a radiação solar (I) incidente, a radiação absorvida (Qa1 e Qa2), reemitida (Q1, Q3, Q5 e Q7) e o ganho por convecção (Q2, Q4, Q6 e Q8).	95
Figura 2.41 - Esquema do ganho de calor na cavidade, no modo isolamento térmico (sem ventilação).	97
Figura 3.1. Fluxograma do processo geral para a concepção e análise de um sistema de fachada dupla. FONTE: adaptado de DOEBBER E MCCLINTOCK, 2006.	105
Figura 3.2. Gráfico de comparação entre os dados medidos e simulados para o verão.	112

Figura 5.1. Estrutura geral da coleta de dados.....	127
Figura 5.2. Características de qualidade e as variáveis de resposta.	129
Figura 5.3. Processo da simulação.	129
Figura 5.4. Fatores constantes dos parâmetros do processo.	130
Figura 5.5. Fatores controláveis dos parâmetros do processo.	130
Figura 6.1. Definição do modelo A : salas comerciais - escritório.	140
Figura 6.2 - Pavimento tipo de edifício comercial - exemplo	141
Figura 6.3 - Sala comercial que representa o modelo A.....	142
Figura 6.4 - Planta da sala comercial : Modelo A - FS	143
Figura 6.5 - Corte da sala comercial : Modelo A – FS.....	143
Figura 6.6 - Corte da sala comercial : Modelo A – FDV.	144
Figura 6.7 - Distribuição das zonas térmicas utilizadas nas simulações.	144
Figura 6.8 - Dimensões e funcionamento da janela da fachada cortina.	147
Figura 6.9 - Dimensões e funcionamento das aberturas da fachada dupla ventilada.	147
Figura 6.10 - Esquema de ventilação cruzada do modelo A - FDV.....	148
Figura 6.11 - Gráfico da diferença de temperaturas internas entre a zona de escritório e a zona da cavidade.	157
Figura 6.12 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.	160
Figura 6.13 - Gráfico da transmissão solar na zona escritório no dia 22 de dezembro.....	163
Figura 6.14 - Gráfico da transmissão solar na zona escritório no dia 21 de junho.....	163
Figura 6.15 - Detalhe das aberturas das esquadrias da FDV e do escritório.	169
Figura 6.16 - Direção dos ventos na fachada analisada.....	170
Figura 6.17 - Sentido do fluxo do ar da ventilação natural da zona escritório e zona da cavidade.....	171
Figura 6.18 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de dentro para fora da zona.....	172
Figura 6.19 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de fora para dentro da zona.....	173
Figura 6.20 - Volume do fluxo do ar nas aberturas da cavidade – modelo FDV_40.....	174
Figura 6.21 - Velocidade do ar na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.....	175
Figura 6.22 - Volume do fluxo do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.....	175
Figura 6.23 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de dentro para fora da zona.....	177
Figura 6.24 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de fora para dentro da zona.....	177

Figura 6.25 - Volume do fluxo do ar nas aberturas da cavidade – modelo FDV_40.....	178
Figura 6.26 - Velocidade do ar na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.....	179
Figura 6.27 - Volume do fluxo do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.....	179
Figura 6.28 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.	181
Figura 6.29 - Consumo de condicionamento dos modelos com fachada com vidro simples e vidro duplo.....	183
Figura 6.30 - Consumo de condicionamento dos modelos com fachada com vidro simples e vidro refletivo.	183
Figura 6.31 - Consumo de energia elétrica para condicionamento dos modelos com uso ou não de proteção solar.	185
Figura 7.1 - Vista aérea da implantação do edifício. Fonte: GoogleMaps. Acesso: 10/03/2011	193
Figura 7.2 - Planta do pavimento tipo – proposta de layout.....	194
Figura 7.3 - Vista da fachada nordeste e sudoeste do edifício.	195
Figura 7.4 - Pavimento tipo com acréscimo da fachada dupla ventilada – planta.	196
Figura 7.5 - Pavimento tipo com acréscimo da fachada dupla ventilada – corte.	197
Figura 7.6 - Módulo da fachada dupla ventilada proposta – corte parcial.	197
Figura 7.7 - Módulo da fachada dupla ventilada proposta – elevação parcial.	198
Figura 7.8 - Visão parcial da fachada nordeste com acréscimo da FDV.....	198
Figura 7.9 - Distribuição das zonas térmicas utilizadas nas simulações.	199
Figura 7.10 - Fachada dupla ventilada do edifício SME, em Kassel, Alemanha. FONTE: Aloísio Leoni Schmid, 2011.....	202
Figura 7.11 - Dimensões e funcionamento da janela do escritório (à esquerda) e as aberturas da FDV (à direita).....	203
Figura 7.12 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.	209
Figura 7.13 - Direção do vento na data de 20 de março.....	213
Figura 7.14 - Volume e velocidade médios do fluxo do ar nas janelas da zona do escritório, nos modelos FS e FDV, para 20 de março.	214
Figura 7.15 - Velocidade do ar no sentido do nó 1 para o 2 na data de 20 de março.....	215
Figura 7.16 - Velocidade do ar no sentido do nó 2 para o 1 na data de 20 de março.....	215
Figura 7.17 - Direção do vento na data de 29 de setembro.	216
Figura 7.18 - Volume e velocidade médios do fluxo do ar nas janelas da zona do escritório, nos modelos FS e FDV, para 20 de setembro.	217
Figura 7.19 - Velocidade do ar no sentido do nó 1 para o 2 na data de 20 de setembro.	218
Figura 7.20 - Velocidade do ar no sentido nó 2 para 1 na data de 20 de setembro.	218
Figura 7.21 - Horas de ocupação fora da faixa de temperaturas nos modelos.	222

Figura 7.22 - Planta do pavimento tipo com subdivisão da zona do escritório.....	226
Figura 7.23 - Vista da fachada nordeste.	232
Figura 7.24 - Vistas do observador da fachada nordeste e sudoeste.	233
Figura 7.25 - Vista do prédio original.	233
Figura 00.1 - Frações de aberturas das esquadrias.	259
Figura 0.2 - Implantação do edifício.	261
Figura 0.3 - Pavimento térreo.	261
Figura 0.4 - Pavimento tipo.	261
Figura 0.5 - Corte longitudinal do edifício.	262
Figura 0.6 - Fachada sudoeste.	262

Lista de tabelas

Tabela 3-1 - Temperaturas operativas aceitáveis calculadas para Curitiba.....	116
Tabela 6-1 - Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV.....	145
Tabela 6-2 - Tabela de vidros utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV.	145
Tabela 6-3 - Cargas térmicas utilizadas nas simulações	146
Tabela 6-4 - Rotinas de funcionamento utilizadas nas simulações.	146
Tabela 6-5 - Rotinas de ventilação utilizadas nas simulações.....	148
Tabela 6-6 - Dados dos dias de projeto de Curitiba. FONTE: GOULART <i>et al.</i> , 1998.	150
Tabela 6-7 – Propriedades físicas dos vidros alternativos nas simulações.	152
Tabela 6-8 - Planejamento das rodadas de simulações.....	154
Tabela 6-9 - Tabela de temperaturas internas comparativas da zona escritório.....	155
Tabela 6-10 - Tabela de temperaturas internas comparativas da zona cavidade.....	156
Tabela 6-11 - Horas de temperaturas fora da faixa de operação passiva e temperaturas extremas, durante o período de ocupação da zona escritório.	157
Tabela 6-12 - Demanda média do condicionamento térmico nos diferentes modelos.....	158
Tabela 6-13 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.	159
Tabela 6-14 - Horas de uso de condicionamento artificial na zona do escritório nos diferentes modelos.....	160
Tabela 6-15 - Transmissão solar média dos modelos FS e FDV.	162
Tabela 6-16 - Transferência de calor por convecção nos modelos.....	164
Tabela 6-17 - Temperaturas da superfície interna da janela e do ambiente nos modelos para 22 de dezembro.....	166
Tabela 6-18 - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela nos modelos.	166
Tabela 6-19 - Temperaturas da superfície interna da janela e do ambientes nos modelos para 10 de julho.	167
Tabela 6-20 - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela nos modelos.	167
Tabela 6-21 - Fluxo de ar médio dos modelos FS e FDV.	169
Tabela 6-22 – Tabela dos resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m ³ /s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 20 de março.....	172
Tabela 6-23 - Tabela dos resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m ³ /s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 29 de setembro.....	176
Tabela 6-24 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.	180
Tabela 6-25 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.	182
Tabela 6-26 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.	184
Tabela 6-27 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C - Zona escritório. ...	185

Tabela 6-28 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C com redução de carga térmica- Zona escritório.....	186
Tabela 7-1 - Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo B - FS e FDV	200
Tabela 7-2 - Tabela de vidros utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV	201
Tabela 7-3 - Cargas térmicas utilizadas nas simulações	201
Tabela 7-4 - Rotinas de funcionamento utilizadas nas simulações.	202
Tabela 7-5 - Planejamento das rodadas de simulações no cenário 1.....	206
Tabela 7-6- Planejamento das rodadas de simulações no cenário 2.....	207
Tabela 7-7 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.	208
Tabela 7-8 - Horas de uso de condicionamento artificial na zona do escritório nos modelos FS e FDV.	209
Tabela 7-9 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, no quinto pavimento.	210
Tabela 7-10- Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, no décimo quinto pavimento.	210
Tabela 7-11 - Consumo total de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, considerando os três pavimentos.	211
Tabela 7-12 – A ventilação e seus efeitos. Fonte: KUKREJA, 1978.....	212
Tabela 7-13 - Temperaturas internas médias dos modelos, na zona escritório.	220
Tabela 7-14 - Número de horas de ocupação fora da faixa de operação passiva 18-26° C - Zona escritório.....	221
Tabela 7-15 - Distribuição das temperaturas das horas de ocupação acima de 26° C - Zona escritório.	222
Tabela 7-16 - Distribuição das temperaturas das horas de ocupação abaixo de 18°C - Zona escritório.	223
Tabela 7-17 - Consumo de energia elétrica para condicionamento, comparando os modelos FS e FDV na orientação real e na simulada.	224
Tabela 7-18 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C na orientação real e no fictício norte.....	225
Tabela 7-19 - Consumo de energia elétrica para condicionamento, comparando os modelos FDV.	226
Tabela 7-20 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C - Zona escritório	227
Tabela 7-21 - Horas em conforto, considerando o ano inteiro, conforme a ASHRAE 55.	228
Tabela 7-22 - Tabela resumo dos resultados obtidos pelas simulações do modelo B.....	229
Tabela 8-1 - Tabela de resumo das variáveis investigadas e a influência da FDV sobre elas.	240

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização da pesquisa.....	17
1.2 Problema de pesquisa.....	20
1.3 Objetivo geral	20
1.3.1 Objetivos específicos.....	20
1.4 Hipótese	20
1.5 Visão geral da estratégia de pesquisa.....	21
1.6 Estrutura da dissertação	22
1.7 Justificativa.....	23
1.7.1 Quanto aos aspectos econômicos e ambientais.....	23
1.7.2 Quanto aos aspectos sociais.....	25
1.7.3 Quanto aos aspectos tecnológicos	27
2. FACHADAS DUPLAS VENTILADAS	29
2.1 Os edifícios e a arquitetura do vidro.....	30
2.1.1 A evolução do uso das fachadas envidraçadas no Brasil.....	32
2.2 As fachadas duplas ventiladas	34
2.2.1 Conceito do sistema de fachada dupla ventilada	35
2.2.2 Componentes da fachada dupla	37
2.2.3 Palavras chaves.....	38
2.3 Evolução histórica da fachada dupla ventilada	38
2.3.1 Os anos 1990	39
2.4 Porque usar fachadas duplas ventiladas	43
2.4.1 Ventilação natural.....	44
2.4.2 Isolamento térmico	46
2.4.3 Ventilação noturna natural.....	47
2.4.4 Controle solar	48
2.4.5 Proteção dos elementos de sombreamento	49
2.4.6 Isolamento acústico	49
2.4.7 Controle e conforto dos ocupantes	49
2.4.8 Iluminação natural	50
2.4.9 Economia de energia e redução dos impactos ambientais	50
2.4.10 Estética	51
2.5 Fachadas duplas em foco: os prós e contras.....	53
2.5.1 Considerações econômicas e sociais.	54
2.6 <i>Retrofitting</i> : definição e exemplo de uso da estratégia	55
2.6.1 Considerações sobre a estratégia de <i>retrofitting</i> de edifícios.....	55
2.6.2 As fachadas duplas ventiladas como estratégia de <i>retrofitting</i>	56

2.6.3	Exemplo de <i>retrofitting</i> com uso de fachada dupla ventilada.....	58
2.7	Tipologias de fachadas duplas ventiladas	62
2.7.1	Critério de classificação: tipo de ventilação	62
2.7.2	Critério de classificação: compartimentação da cavidade	63
2.7.2.1	<i>Multi-storey façade</i> ou fachada de múltiplos pavimentos	63
2.7.2.2	<i>Corridor façade</i> ou fachada corredor	64
2.7.2.3	<i>Box-window façade</i> ou fachada janela-caixa	65
2.7.2.4	<i>Shaft-box façade</i> ou fachada com shaft vertical	65
2.7.2.5	<i>Multi-storey louver façade</i>	66
2.7.2.6	Avaliação das tipologias de fachada dupla ventilada	67
2.7.3	Critério de classificação: modo de ventilação da cavidade.....	68
2.7.3.1	Classificação desenvolvida por Lang e Herzog (2000)	68
2.7.3.2	Classificação desenvolvida pelo BBRI (2004)	70
2.7.3.3	Coexistência de diferentes modos de ventilação na mesma fachada	72
2.7.3.4	Combinação dos três critérios de classificação.....	72
2.8	O comportamento da fachada dupla ventilada e as propriedades físicas da cavidade	73
2.8.1	Fluxo do ar na cavidade e ventilação.....	73
2.8.1.1	Fachadas duplas ventiladas naturalmente	74
2.8.1.2	Comportamento da FDV na condição de calor e de frio	76
2.8.1.3	Otimização do fluxo do ar por convecção em cavidades naturalmente ventiladas	79
2.8.1.4	Ventilação natural do edifício e a fachada dupla ventilada	81
2.8.1.5	Fachadas duplas ventiladas mecanicamente	85
2.8.2	Transferência de calor	87
2.8.2.1	Balço térmico.....	93
2.8.3	Influência do tipo de vidro no desempenho térmico das FDV	98
2.8.4	A influência dos dispositivos de sombreamento no desempenho térmico das FDV	99
3.	DIRETRIZES DE PROJETO E DE SIMULAÇÃO PARA FACHADAS DUPLAS VENTILADAS.....	101
3.1	Diretrizes de projeto	101
3.1.1	Parâmetros de desempenho na concepção das fachadas duplas ventiladas	103
3.1.2	Processos de análise para projeto de fachadas duplas ventiladas	104
3.2	Abordagens de simulação para as fachadas duplas ventiladas	106
3.2.1	Programa de simulação integrada <i>EnergyPlus</i>	108
3.2.2	Simulação de fluxos de ar entre zonas no <i>EnergyPlus</i> : módulo <i>AirflowNetwork</i>	110
3.2.3	Validação do <i>EnergyPlus</i> para simulação de fachadas duplas ventiladas.....	111
3.3	Dados climáticos da cidade de Curitiba	113
3.4	Crterios para definição das faixas de temperatura para o modo de operação passivo do edifício e temperaturas de conforto	114
4.	SUMÁRIO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	117

5.	DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	122
5.1	Unidade de análise	122
5.1.1	Caracterização do modelo de FDV a ser estudado	122
5.2	Delimitação da pesquisa	122
5.3	Caracterização do problema	123
5.4	Seleção das técnicas de pesquisa	123
5.5	Técnicas de coleta de dados	124
5.5.1	Revisão bibliográfica	124
5.5.2	Simulação	124
5.6	Protocolo de coleta de dados.....	126
5.6.1	Critérios para seleção das amostras	126
5.6.1.1	Amostra para o levantamento e estudo de caso	126
5.6.2	Etapas da coleta de dados	126
5.6.2.1	2ª Etapa: Simulação	127
5.6.2.2	Procedimento de simulação no <i>Energy Plus</i>	131
5.6.2.3	Variáveis de resposta no <i>Energy Plus</i>	132
5.7	Estratégias de análise de dados.....	135
5.7.1	Simulação	135
5.8	Testes de validade	136
5.8.1	Validade do constructo	136
5.8.2	Validade externa.....	137
5.8.3	Validade interna.....	137
5.8.4	Confiabilidade	138
6.	SIMULAÇÕES DO MODELO A: ESCRITÓRIO TIPO SALA COMERCIAL	139
6.1	Descrição do modelo	139
6.1.1	Seleção do modelo do escritório.....	139
6.1.2	Definição do modelo de escritório.....	141
6.1.3	Modelo A – FS	142
6.1.4	Modelo A – FDV.....	143
6.2	Descrição das simulações.....	144
6.2.1	Zonas térmicas.....	144
6.2.2	Materiais e elementos construtivos.....	145
6.2.3	Cargas térmicas e rotinas de funcionamento	146
6.2.4	Configuração das aberturas para ventilação natural e controles de temperatura	147
6.2.4.1	Parâmetros básicos para o cálculo da ventilação.	148
6.2.4.2	Definição das zonas para ventilação natural.....	149
6.2.4.3	Propriedades das superfícies para ventilação natural.....	149
6.2.5	Detalhamento dos componentes das aberturas	149
6.2.6	Configuração do condicionamento artificial.....	150

6.2.7	Configuração da proteção solar	151
6.2.8	Configuração dos tipos de vidro alternativos	151
6.2.9	Configuração da orientação da fachada	152
6.3	Planejamento das simulações	152
6.4	Resultados.....	155
6.4.1	Primeira rodada	155
6.4.2	Segunda rodada	158
6.4.3	Terceira rodada.....	161
6.4.3.1	Transmissão solar	161
6.4.3.2	Transferência de calor por convecção	164
6.4.3.3	Temperaturas das superfície da janela.....	165
6.4.4	Quarta rodada	168
6.4.5	Quinta rodada	180
6.4.6	Sexta rodada	181
6.4.7	Sétima rodada	184
6.5	Discussão dos resultados	186
6.5.1	Análise comparativa das temperaturas internas da zona do escritório nos modelos FS e FDV.....	187
6.5.2	Análise comparativa do consumo de energia elétrica para condicionamento da zona do escritório nos modelos FS e FDV	189
6.5.3	Análise comparativa da transferência de calor nos modelos FS e FDV	189
6.5.4	Análise comparativa da ventilação natural na zona do escritório nos modelos FS e FDV	189
6.5.5	Análise comparativa da influência da orientação solar no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV	190
6.5.6	Análise comparativa da influência do uso de vidros especiais no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV.....	190
6.5.7	Análise comparativa da influência do uso de proteção solar no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV.....	191
7.	SIMULAÇÕES DO MODELO B: EDIFÍCIO COMERCIAL EXISTENTE	192
7.1	Descrição do modelo	192
7.1.1	Implantação e contexto urbano	193
7.1.2	Características construtivas do edifício	194
7.1.3	Fachada dupla ventilada	196
7.2	Descrição das simulações.....	199
7.2.1	Zonas térmicas.....	199
7.2.2	Materiais e elementos construtivos.....	200
7.2.3	Cargas térmicas e rotinas de funcionamento	201
7.2.4	Configuração das aberturas para ventilação natural e controles de temperatura	203
7.2.5	Configuração do condicionamento artificial.....	203
7.2.6	Configuração da proteção solar	204
7.3	Planejamento das simulações	204

7.4	Resultados	207
7.4.1	Primeira, segunda, terceira e quarta rodadas	207
7.4.2	Quinta rodada	210
7.4.3	Sexta rodada	211
7.4.4	Sétima, oitava e nona rodadas	219
7.4.5	Influência da orientação solar	223
7.4.5.1	Cenário 1 – influência da orientação sobre a demanda por condicionamento artificial	223
7.4.5.2	Cenário 2 – influência da orientação sobre as temperaturas internas na zona do escritório	225
7.5	Análises complementares	225
7.5.1	Simulações do modelo B com subdivisões internas	225
7.5.2	Simulações do modelo B considerando uma faixa de conforto	227
7.6	Análise dos resultados	228
7.7	O edifício após a proposta de <i>retrofitting</i> com fachadas duplas ventiladas	232
8.	CONCLUSÕES	234
8.1	Atendimento aos objetivos propostos e confirmação das hipóteses	237
8.2	Resultados relevantes	240
8.3	Análise crítica dos resultados	241
8.4	Considerações finais	246
8.5	Sugestões de trabalhos futuros	247
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	249
8.6	Bibliografia complementar	255
	APÊNDICES	257
	Detalhamento dos componentes das aberturas no <i>Energyplus</i>	258
	Modelo B: edifício sede do Instituto de Engenharia do Paraná	261

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da pesquisa

Em maio de 2005, Branislav Todorovic, um pesquisador sérvio, apresentou na Conferência Internacional *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*¹, na Grécia, um trabalho conceitual sobre como um edifício poderia imitar o comportamento térmico do ser humano. Segundo o autor, o organismo humano é provavelmente um exemplo perfeito de comportamento térmico e de adaptação a condições climáticas diversas. O artigo procurou identificar características do organismo humano e de seu comportamento que podem ser expressas em edifícios, como por exemplo, o uso de resfriamento evaporativo, atingido pelo homem através do suor. Estas estratégias relacionam-se com efeitos energéticos potenciais.

As funções humanas de interação com o meio ambiente térmico, seja a sua proteção contra a perda excessiva de calor ou de superaquecimento, estão localizadas no centro do cérebro, o hipotálamo. O centro nervoso recebe estímulos dos sensores da pele, induzindo reações corporais adequadas (expansão ou retração dos vasos sanguíneos, suor ou tremores). É feito instintivamente, sem esforço consciente de um homem, já que as reações são o resultado de uma reação inerente ao registo temperaturas ambientais baixas ou altas. Usando seu intelecto, o homem soma às suas reações instintivas algumas estratégias de proteção. Ele se movimenta, procura locais sombreados, usa chapéu ou guarda-sol; encontra oásis de calor ou de frio, usa blusas, casacos, luvas, etc. No verão, o organismo humano autonomamente se protege através do suor; conscientemente, o homem se protege da radiação solar usando roupas leves, cores e materiais que refletem radiação e não acumulam calor além de serem condutores de umidade.

Como o homem reduz sua perda de calor? A circulação sanguínea se reduz, as veias se retraem, mas o homem também se veste, adicionando uma camada de proteção sobre seu corpo, sua pele, assim adquirindo melhor isolamento. Este comportamento pode ser adicionado a edifícios: estes podem ser cobertos com uma pele adicional (como um *pullover*), no inverno para protegê-los do vento e baixas temperaturas e, no verão, proteger o edifício da

¹ Conferência internacional de estratégias passivas e de baixo consumo de energia para climatização de edifícios.

ação do sol, de forma a reduzir os ganhos por radiação solar. Desta forma a energia necessária para seu condicionamento de ar seria reduzida.

A dupla proteção do edifício, como descrita pelo autor, configura um sistema de fachada dupla, usualmente envidraçada, conformando entre as duas camadas (interna e externa) um espaço intersticial para circulação do ar.

No inverno, esta fachada dupla representa uma cobertura adicional para o edifício, e no verão poderá ser sua proteção do sol: “o casaco de inverno é substituído por um material de maior tamanho, com espaço entre este e o corpo, assim o ar pode circular em sua proximidade”. No espaço intersticial podem ser colocados dispositivos de proteção solar, para sombreamento, mantendo o espaço para circulação do ar, de forma que a temperatura do ar interno se mantenha o mais próximo possível do ar externo. As aberturas da dupla fachada podem ser abertas no verão para permitir a circulação do ar, e fechadas no inverno para criar uma camada isolante, reduzindo as perdas de calor do edifício. A vantagem do uso deste tipo de fachada, segundo o autor, é tornar o funcionamento do edifício mais dinâmico, procurando se adaptar ao momento climático do ano com menor dependência da climatização artificial.

A partir dos anos 1990, a tipologia de fachadas duplas ventiladas passou a ser intensamente utilizada na Europa, principalmente em edifícios de escritórios. Esta tendência procurou conciliar a exploração estética da transparência do vidro na arquitetura com preocupações de eficiência energética. Segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), o sistema de fachadas duplas baseia-se na noção de fechamentos externos com a característica de responder dinamicamente à variação das condições ambientais do local de um edifício, incorporando elementos de sombreamento integrados, ventilação natural e estratégias de isolamento térmico.

As fachadas duplas ventiladas apresentam um comportamento distinto das fachadas convencionais, devido à complexidade dos processos físicos envolvidos que afetam o desempenho do edifício como um todo. Para atingir objetivos como eficiência energética e conforto ambiental, seu projeto deve ser alvo de intenso planejamento e simulações para prever seu desempenho e otimizar os parâmetros de projeto do sistema. Estudos com diferentes enfoques têm sido realizados a fim de entender melhor as fachadas duplas e propor métodos para previsão do seu comportamento, principalmente na Europa, China e Estados Unidos. Na literatura científica, ainda, são encontradas análises tanto a favor como contra o seu uso, considerando o ponto de vista das construções que buscam ser sustentáveis

ambientalmente. Outras vantagens potenciais são associadas ao sistema: possibilidade de maior uso da estratégia de ventilação natural, aproveitamento da iluminação natural, ventilação noturna, segurança patrimonial, controle de incidência solar, isolamento acústico e promoção de um ambiente mais confortável para os ocupantes.

Devido à multiplicidade de configurações possíveis e a complexidade das variáveis envolvidas, a implementação em um edifício do sistema de fachada dupla ventilada deve ser estudado intensamente, a fim de prever seu comportamento nos diversos requisitos a serem atingidos, e a partir disto definir as características construtivas que o sistema deve apresentar para assegurar seu correto funcionamento ao longo do ano e evitar que efeitos contrários aos desejados aconteçam. Como este sistema é fortemente dependente das condições externas (como a radiação solar e temperatura externa), já que estas influenciam o clima interno, deve ser projetado considerando as particularidades de seu contexto e orientação da fachada, de outra forma o desempenho não será satisfatório. Em outras palavras: a individualidade do projeto da fachada é a chave para o alto desempenho.

Uma oportunidade que se apresenta para o uso das fachadas duplas ventiladas refere-se à renovação ou *retrofitting*² de edifícios existentes, que de alguma forma, com o passar do tempo, tornaram-se obsoletos ou cujo desempenho energético está abaixo dos padrões atuais. Este assunto, no entanto, é pouco explorado pela literatura científica, que têm focado principalmente o uso do sistema aliado a novas construções. Usada como estratégia de *retrofitting*, e com o adequado planejamento, melhoras no desempenho ambiental e conforto dos ocupantes podem ser esperadas. As vantagens da renovação eficiente de um edifício existente, em comparação com o cenário de sua demolição, apresentam um saldo positivo com relação à utilização de recursos naturais e limitados, emissões gases do efeito estufa, geração de resíduos e economia de tempo e de recursos financeiros. Outro aspecto se relaciona à recuperação e renovação de edifícios obsoletos: a possibilidade de readequação e reinserção destes à estrutura da cidade, contribuindo para a maximização e otimização do espaço construído, assim como para a preservação dos valores arquitetônicos e paisagísticos das cidades.

² *Retrofitting* significa a recuperação, manutenção e restauração de edifícios, que objetiva possibilitar a readequação e a reinserção destes edifícios à estrutura da cidade, contribuindo para a maximização e otimização do espaço construído; assim como para a preservação dos valores arquitetônicos e paisagísticos das cidades.

Na revisão bibliográfica, uma extensa pesquisa foi realizada a fim de aproximar-se ao estado da arte sobre fachadas duplas ventiladas. O levantamento da literatura abordou os seguintes tópicos: definições do sistema de fachadas duplas ventiladas, classificação e tipologias, comportamento físico, modelos de simulação, diretrizes de projeto, vantagens e desvantagens do seu uso. Estas informações pretenderam subsidiar o desenvolvimento do objetivo da pesquisa e responder ao problema de pesquisa.

1.2 Problema de pesquisa

O presente trabalho pretende responder à seguinte questão:

Como o uso de fachadas duplas ventiladas influencia o desempenho térmico e energético de edifícios em Curitiba, utilizados como escritórios?

1.3 Objetivo geral

Analisar o desempenho térmico e energético de edifícios de escritórios com fachadas duplas ventiladas, em condição de clima subtropical, esclarecendo a sua sensibilidade em relação a temperaturas internas, transmissão de calor e radiação solar, temperaturas das superfícies internas, velocidade do ar e consumo de energia elétrica para condicionamento artificial. A estratégia utilizada é experimental (simulação) e a delimitação geográfica, Curitiba.

1.3.1 Objetivos específicos

- a) Estabelecer comparações do desempenho do sistema de fachada dupla ventilada com sistemas de fachadas convencionais.
- b) Propor o uso de fachadas duplas ventiladas em um edifício real pela estratégia de *retrofitting* da fachada existente, a fim de melhorar o desempenho térmico e energético do edifício selecionado.

1.4 Hipótese

Estudos demonstrando a vantagem energética do uso da fachada dupla ventilada em edifícios de escritório, em clima frio ou temperado, são frequentes na literatura. Curitiba situa-se na zona bioclimática brasileira 1 (ABNT, 2003), e apresenta uma condição climática

atípica para o contexto brasileiro, por ser mais fria que a maioria das cidades. Este estudo parte da hipótese que o uso do sistema de fachada dupla ventilada é uma solução alternativa aos fechamentos convencionais de edifícios de escritórios em Curitiba, promovendo como vantagens:

- Redução dos gastos com energia elétrica operacional da edificação relativa ao condicionamento ambiental.
- Maior aproveitamento da ventilação natural para os ambientes de trabalho, o que reverterá em melhoria das condições de conforto para seus ocupantes.
- Maior eficiência no uso de proteção solar, com solução mais simples e de menor manutenção.
- Maior disponibilidade de horas para operação passiva do edifício, considerando a faixa de temperaturas internas entre 18°C e 26°C. Esta faixa representa as temperaturas internas nos ambientes onde o conforto é avaliado usando temperaturas base de 18° C (para aquecimento) e 26° C (para resfriamento), para o ano completo, conforme exigências do Regulamento de avaliação da conformidade do nível de eficiência energética para edifícios comerciais, de serviços e públicos (BRASIL-a, 2009), para edifícios ou ambientes naturalmente ventilados.

1.5 Visão geral da estratégia de pesquisa

O método aplicado nesta pesquisa contará com duas técnicas de coleta de dados distintas: revisão bibliográfica e simulação.

O objetivo da revisão bibliográfica, enquanto técnica de coleta de dados, é fornecer subsídios para a realização da etapa de simulação, quanto ao entendimento do sistema de fachadas duplas ventiladas, seu comportamento físico, parâmetros de projeto, procedimentos de modelagem e simulação e resultados esperados. Nesta etapa também serão definidos a técnica de simulação a ser utilizada na pesquisa.

Para obter os resultados para análise, referentes aos objetivos e à hipótese de trabalho, foram realizadas simulações computacionais aplicadas a dois modelos representativos de edificações usadas como escritório em Curitiba. Os modelos foram denominados de A e B, e cada um foi modelado no programa com a configuração de fachada convencional ou simples (modelo base de referência para comparações) e com a adição da fachada dupla ventilada (modelo proposto). O modelo A é conceitual, e representa uma

unidade de escritório de um edifício comercial de Curitiba, configurado a partir de pesquisa junto ao mercado imobiliário. Já o modelo B representa um edifício real, selecionado para aplicação da estratégia de *retrofitting* de fachada.

Em resumo, as técnicas selecionadas para este estudo foram desenvolvidas em duas etapas principais e duas etapas secundárias, de acordo com a sistematização a seguir:

- 1ª Etapa - Revisão bibliográfica.
- 2ª Etapa - Simulações:
 - Simulações do Modelo A.
 - Simulações do Modelo B.

1.6 Estrutura da dissertação

A dissertação foi estruturada em oito capítulos, a saber:

- Capítulo 1: contextualização da Pesquisa, pergunta do problema, objetivos, hipóteses e justificativa. Visão geral do método.
- Capítulo 2: revisão bibliográfica sobre fachadas duplas ventiladas, incluindo conceitos, tipologias e classificação, vantagens e desvantagens, exemplos e propriedades físicas.
- Capítulo 3: revisão bibliográfica sobre diretrizes de projeto e de simulação para fachadas duplas ventiladas.
- Capítulo 4: sumário da revisão bibliográfica (capítulos 2 e 3).
- Capítulo 5: definição do método de pesquisa e apresentação da técnica de simulação utilizada.
- Capítulo 6: simulações do modelo virtual A – uso do sistema de fachada dupla ventilada em uma sala comercial hipotética utilizada com escritório, com o objetivo de investigar as seguintes variáveis de desempenho: temperaturas internas, transmissão de calor e radiação solar, temperaturas das superfícies internas, velocidade do ar e consumo de energia elétrica para condicionamento artificial.
- Capítulo 7: simulações do modelo virtual B – uso do sistema de fachada dupla ventilada com estratégia de *retrofitting* de fachada em um edifício de escritório existente. As variáveis investigadas são: temperaturas internas, velocidade do ar e consumo de energia elétrica para condicionamento artificial.

- Capítulo 8: conclusões, abrangendo os seguintes tópicos:
 - Sumário da revisão bibliográfica (capítulos 2 e 3).
 - Atendimento aos objetivos propostos e confirmação da hipótese.
 - Resultados relevantes.
 - Análise crítica dos resultados.
 - Considerações finais.
 - Sugestões para trabalhos futuros.

1.7 Justificativa

1.7.1 Quanto aos aspectos econômicos e ambientais

No Brasil, 44% do consumo de energia elétrica total produzida no país destinam-se à operação de edificações. Deste total, de acordo com a Resenha energética brasileira (BRASIL-b, 2009), 22,6% da eletricidade é consumida pelo setor comercial e público. Com relação ao ano de 2008, houve um crescimento de 5,4% no consumo de energia elétrica pelo setor. Quanto à participação das fontes de energia na sua operação, as edificações comerciais e públicas caracterizam-se por um intenso uso de eletricidade, em torno de 85% do total (BRASIL-b, 2008).

A tendência de aumento do consumo de energia elétrica pelos edifícios comerciais continuará ao longo dos próximos anos, devido ao aumento substancial da área construída, atrelado à prosperidade econômica dos novos desenvolvimentos de negócios, e as necessidades de uso energético associadas (PÉREZ-LOMBARD, 2007). O intenso uso de energia para a operação destes edifícios decorre da necessidade de uso de iluminação artificial, mesmo durante o dia, do uso de equipamentos de informática e do uso de ar condicionado para manter as condições de conforto térmico para seus usuários. Estes três itens representam elementos chaves do consumo de eletricidade por este setor de edificações.

Nos edifícios de escritórios brasileiros, o sistema de iluminação consome de 12 a 57% do gasto total de energia, o condicionamento de ar entre 25 e 75% e os equipamentos de 6 a 38%, dependendo da região do país (FIGURA 1.1). Em média, o consumo para estas edificações para condicionamento de ar é de 34% (BRASIL, 2007).

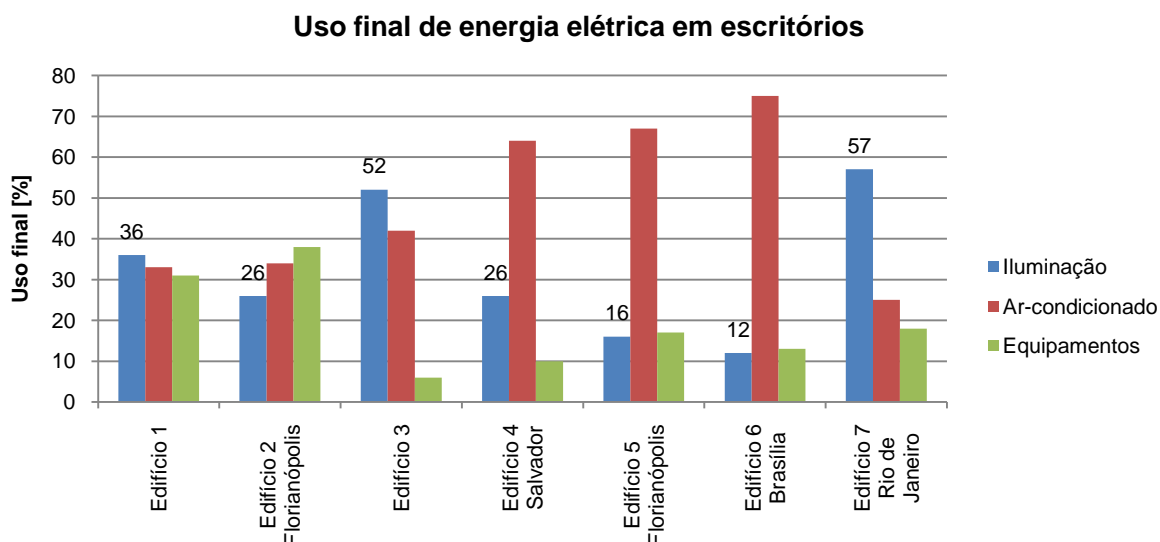


Figura 1.1. Uso final de energia elétrica em escritórios. FONTE: BRASIL-a, 2008

Os edifícios de escritórios representam uma tipologia uniforme dentro do estoque de edificações, tanto pelas suas características de consumo operacional, quanto pelas soluções de suas envoltórias (PÉREZ-LOMBARD, 2007). Os padrões de utilização dos escritórios resultam em significativos ganhos de calor internos, decorrentes da intensa ocupação por pessoas e larga utilização de equipamentos, assim como as soluções de fachadas usualmente adotadas, com grandes panos envidraçados e inexistência de proteções solares, provocam o aumento de ganhos e perdas térmicos consideráveis. Estes padrões impactam diretamente no significativo uso de eletricidade por estes edifícios, já que o conforto térmico, parâmetro chave para promover um ambiente de trabalho saudável e produtivo, é tradicionalmente atingido a partir de extenso uso de energia para aquecimento ou resfriamento (TAYLOR, 2007). Por outro lado, um edifício projetado de forma a melhorar seu desempenho térmico poderá promover conforto com menor consumo de energia.

Em 2001, o governo brasileiro sancionou a Lei de Eficiência Energética, como parte da Política Nacional de Conservação e Uso racional de Energia, com objetivo de alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (BRASIL, 2001). Como uma das metas da lei, está o desenvolvimento de mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações. Em 2007, como providência desta meta, foi publicado o documento Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, fruto dos estudos do PROCEL (programa de governo voltado para a conservação de energia elétrica) em conjunto com os pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina. A regulamentação inclui três requisitos principais

para avaliação das edificações: eficiência e potência instalada do sistema de iluminação, eficiência do sistema de condicionamento do ar e o desempenho térmico da envoltória do edifício (BRASIL, 2007).

Segundo o PROCEL, o conceito de eficiência energética significa “melhorar a maneira de utilizar a energia, sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona”, ou seja, “significa diminuir o consumo, reduzindo custos, sem perder, em momento algum, a eficiência e a qualidade dos serviços” (BRASIL-a, 2008).

A adesão à classificação de edifícios quanto à eficiência energética, segundo a regulamentação do PROCEL de 2007, atualmente é voluntária, tanto para edificações novas quanto existentes, mas passará a ter caráter obrigatório para edificações novas em 2012. Para avaliação nos três requisitos solicitados, foram determinadas as seguintes proporções: para a envoltória e iluminação, peso de 30% cada um, e para o sistema de condicionamento de ar, peso de 40% (BRASIL, 2007). Para obter a classificação geral do edifício, os requisitos são avaliados separadamente, e, conforme o peso de cada um, chega-se a pontuação final, onde a etiquetagem obtida varia de A (mais eficiente) a E (menos eficiente).

Uma das vantagens da utilização do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios é a conservação de energia, pela diminuição do uso de condicionamento de ar para climatização dos ambientes, e potencialização do uso de estratégias de ventilação natural (POIRAZIS, 2004). Levantamentos realizados no Reino Unido registraram que edificações naturalmente ventiladas promoveram uma diminuição no consumo de energia total de operação na ordem de 15% (EMMERICH; DOLS E AXLEY 2001).

Ou seja, a presente pesquisa justifica-se, ambientalmente e economicamente, ao propor o estudo de um sistema que tem por características a melhora do desempenho dos envoltórios, eficiência energética e consequente diminuição nos gastos com eletricidade na etapa de ocupação do edifício. Iniciativas que procuram índices de maior eficiência no seu uso, através da redução do consumo e do desperdício, diminuem a necessidade do aumento da produção de energia, levando à exploração racional dos recursos naturais e maior proteção do meio ambiente.

1.7.2 Quanto aos aspectos sociais

O uso de fachadas duplas ventiladas, em edifícios utilizados para o trabalho, tem impacto direto sobre a sensação de conforto de seus ocupantes.

As fachadas duplas ventiladas, de acordo com a literatura científica, podem promover maior uso da estratégia de ventilação natural para os ambientes, bom aproveitamento da iluminação natural e isolamento acústico contra ruídos externos. Estes elementos serão percebidos pelos ocupantes como promoção de um ambiente com maior conforto.

Um dos aspectos mais buscados atualmente pela sustentabilidade nos edifícios comerciais, internacionalmente, é o uso da ventilação natural. Além do potencial de reduzir o consumo energético total, existem implicações quanto à percepção dos usuários, expressa em parte pela ocorrência da síndrome dos edifícios doentes ou SBS, *sick building syndrome*. Esta doença, que vêm sendo estudada nos Estados Unidos desde os anos 90, refere-se a um estado doentio transitório, já que os sintomas desaparecem quando as pessoas deixam o edifício. A origem do problema relaciona-se com a troca deficiente do ar interno (contaminado pelos poluentes) pelo ar externo limpo e com a manutenção inadequada do sistema de condicionamento do ar, fonte de micro-organismos.

Segundo Carmo e Prado (1999), uma série de contaminantes é produzida no interior dos edifícios, por exemplo, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amônia, óxido de enxofre e nitrogênio. Estes poluentes são originados tanto pelos materiais de construção utilizados, quanto pelos materiais de limpeza, mofo, bolor, metabolismo humano e inclusive pelas próprias atividades realizadas no interior da edificação. Segundo o *U.S. Environmental Protection Agency*, os níveis de poluentes no ar interno dos edifícios podem chegar a cinco vezes maiores que o nível do ar exterior. Como se estima que as pessoas passem de 80 a 90% do tempo no interior de edifícios, tais poluentes podem comprometer a saúde e rendimento do trabalho dos usuários.

Os ambientes que utilizam a estratégia da ventilação natural, projetada de forma a tornar o recurso confiável e controlável, apresentam melhor desempenho quanto à garantia da qualidade do ar interno, atendimento das expectativas dos ocupantes e criação de maiores zonas de conforto (EMMERICH; DOLS e AXLEY 2001). Os estudos da SBS também indicam que a percepção pelo usuário de maior controle individual sobre a ventilação e a temperatura no ambiente, pela abertura intencional de janelas, por exemplo, são associados com diminuição dos sintomas da síndrome. Além disso, ambientes artificialmente condicionados são associados a ruído, enquanto os naturalmente ventilados são associados a quietude. Segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), o pano exterior da fachada dupla cria

uma camada de ar adjacente ao edifício não afetada pela alta velocidade dos ventos, assim a ventilação natural pode ser melhor aproveitada.

Segundo Arons (2000), as fachadas duplas ventiladas promovem um ambiente percebido como confortável por seus ocupantes, por possibilitar o controle individual dos dispositivos de sombreamento posicionados na cavidade e abertura intencional de janelas de acordo com a vontade do usuário. O controle das condições ambientais (iluminação, ventilação e incidência solar) pelo ocupante deve prevalecer quanto às questões de eficiência energética e de padrões de conforto pré-estabelecidas. O autor cita o benefício psicológico proporcionado por uma fachada dinâmica e controlada individualmente, contra a sensação de ocupar um ambiente automatizado que ajusta as vistas, iluminação e condições térmicas por um sistema de controle centralizado. Em um ambiente onde os trabalhadores se sintam mais confortáveis física e psicologicamente, aumento da produtividade pode ser esperado.

Assim, a presente pesquisa justifica-se, também **socialmente**, ao propor o estudo de um sistema que tem por vantagem permitir o maior controle individual das condições ambientais e proporcionar locais para trabalho mais confortáveis.

1.7.3 Quanto aos aspectos tecnológicos

O desenvolvimento da tecnologia da fachada dupla ventilada foi impulsionado pela necessidade de melhorar o desempenho dos fechamentos largamente envidraçados em edifícios, esta uma tendência arquitetônica difundida mundialmente nas últimas décadas. A FDV representa um sistema de fachada de alto desempenho (LEE, *et al.*, 2002) por promover a redução do consumo de condicionamento artificial dos edifícios que usam esta solução, ao mesmo tempo possibilitando a manutenção de condições de conforto para os ocupantes. Às fachadas duplas ventiladas é associada a característica de adaptação às variações das condições climáticas do edifício, pelo uso de ventilação natural controlada e pela proteção solar flexível e de fácil manipulação. Mas as possibilidades do uso do sistema não se restringem a edificações novas, pelo contrário, quando associado a edifícios existentes, como uma forma de renovação arquitetônica dos mesmos, os ganhos ambientais, sociais e tecnológicos são ainda mais significativos.

A fachada dupla ventilada é apontada como uma importante estratégia de *retrofitting* de edifícios, por poder ser adicionada à estrutura existente para melhorar o desempenho térmico e energético da edificação, sem necessariamente demandar a substituição dos

elementos de fachada existentes. Desta forma, o saldo ambiental é positivo, já que a demolição e geração de resíduos são minimizadas. A adaptação da fachada dupla ao edifício existente pode ser executada sem que o mesmo deixe de ser ocupado, isto é, não é preciso interromper as atividades normais para que esta renovação seja implementada.

Segundo Rey (2004), um projeto de *retrofitting* sempre gera um princípio de alteração, que deve ser selecionado não só no que diz respeito ao desempenho da estratégia prevista, mas também em relação ao grau de degradação, à qualidade arquitetônica e valor histórico da substância original. Nesse sentido, a substituição de uma fachada existente leva a uma decisão mais radical. De acordo com o grau de desempenho planejado (conforto, energia, custos, etc.), a estratégia de fachada dupla ventilada pode oferecer uma alternativa positiva, por aliar a conservação da substância original e a metamorfose da imagem do edifício.

Segundo Cianciardi e Bruna (2004), o *retrofit* é uma ferramenta de sustentabilidade arquitetônica, por propiciar a maximização do ciclo de vida dos edifícios existentes, de forma a readequá-los às necessidades dos novos ocupantes e tornando-os funcionais para o tempo presente. O uso de fachada dupla ventilada para este fim é pouco explorada no Brasil, e este estudo poderá auxiliar a divulgação e o planejamento do uso do sistema como estratégia de *retrofitting* de edifícios obsoletos.

2. FACHADAS DUPLAS VENTILADAS

A fachada atua como um elemento mediador entre as condições térmicas do interior e exterior de um edifício. Sua função principal, portanto, é de promover um ambiente de trabalho confortável para os ocupantes (ARONS, 2000), ao permitir a passagem de ar, da luz natural e do calor do sol (quando desejável) em medida adequada ou, ao contrário, bloquear sua entrada nos ambientes.

Conceitos inovadores aplicados ao projeto dos envoltórios dos edifícios têm se tornado cada vez mais relevantes, segundo Streicher (2005). A demanda por ventilação natural em edifícios comerciais aumentou devido à crescente consciência ambiental, enquanto o consumo energético dos edifícios precisa ser reduzido. Uma fachada inovadora deverá permitir conforto ambiental interno, proteção acústica e boa iluminação natural, ao mesmo tempo reduzindo a demanda por energia extra.

A revisão bibliográfica abordou os seguintes tópicos principais:

- Considerações sobre os edifícios e a arquitetura de vidro.
- Definições do sistema de fachadas duplas ventiladas, classificação e tipologias.
- Razões para uso do sistema.
- Comportamento físico do sistema.
- Os prós e contras do uso das fachadas duplas ventiladas, do ponto de vista das construções sustentáveis.
- O uso de fachadas duplas ventiladas como estratégia de *retrofitting*.
- Modelos de simulação e parâmetros de projeto.

Estas informações pretenderam subsidiar o desenvolvimento do objetivo da pesquisa, a formulação das hipóteses e orientar a definição das estratégias de coletas de dados. Para melhor entendimento do conteúdo da revisão bibliográfica, optou-se por dividi-la em dois capítulos, um sobre os conceitos gerais do sistema, e outro sobre diretrizes de projeto e de simulação para fachadas duplas ventiladas. Um terceiro capítulo apresenta o sumário das informações coletadas.

2.1 Os edifícios e a arquitetura do vidro

Segundo Lee *et al.* (2002), a tendência europeia do uso de fachadas intensamente envidraçadas em edifícios de escritórios, difundiu-se mundialmente. Grandes áreas do envelope, ou mesmo a fachada inteira, são envidraçadas, com uso eventual de elementos para sombreamento. No entanto, o uso intenso de vidro traz como inconvenientes a permeabilidade à radiação solar e baixo isolamento térmico, tornando mais complexas e onerosas as soluções de condicionamento dos ambientes internos a fim de mitigar estes efeitos indesejados.

A partir dos anos 1990, começaram a surgir projetos de edifícios corporativos e públicos, principalmente no norte da Europa, cujas fachadas passaram a empregar uma segunda lâmina, externa, de forma a configurar um sistema de dupla pele com um espaço intersticial para acúmulo ou circulação do ar. As abordagens projetuais que levam à escolha deste sistema variam, mas frequentemente objetivam maiores benefícios de conforto para seus ocupantes, assim como práticas sustentáveis associadas à redução do uso de energia.

O vidro para construção foi alvo de muitas inovações nos últimos vinte anos, evoluindo para um material de alta tecnologia para fachadas que, usado corretamente, resulta em edifícios que pretendem ser esteticamente elegantes e ousados, com valor simbólico de contemporaneidade e tecnologia. A transparência dos envelopes é associada a uma imagem corporativa de abertura para a sociedade, assim como resulta em uma arquitetura que se comunica com seu entorno (STREICHER, 2005). A tecnologia das fachadas duplas ventiladas desenvolveu-se impulsionada pelas explorações da transparência na arquitetura e inovações tecnológica do vidro, e é considerada por muitos arquitetos como um *design* ambientalmente responsável (HARRISON E MEYER-BOAKE, 2003).

Segundo Andreotti (2003), foi a partir do século XIX que o desenvolvimento tecnológico permitiu que a estrutura dos edifícios passasse a ser independente das vedações, de forma a dar origem a um novo tipo de envoltório completamente envidraçado. No princípio, o uso extensivo de vidro na arquitetura era evitado devido ao seu desempenho baixo, enquanto isolante, e os decorrentes problemas relacionados com as condições de conforto térmico. A invenção do primeiro sistema de *fan coil* desumidificante por Willis Carrier, em 1902, precursor dos modernos equipamentos de ar condicionado, possibilitou o desenvolvimento da tipologia destes edifícios amplamente envidraçados.

Os arranha-céus modernistas, com suas fachadas cortina envidraçadas, usaram deste suporte de serviços mecânicos para manter boas condições ambientais internas, no entanto,

com altos níveis de consumo de energia resultantes do condicionamento. Segundo Braham (2005), este desejo por grandes áreas de transparência foi sendo temperado, ao longo do tempo, pelos efeitos ambientais negativos decorrentes das propriedades físicas dos vidros: grande perda de calor para o ambiente externo nos períodos de frio e excessivo ganhos de calor interno pela radiação solar durante os períodos quentes.

A crise de energia de 1973 levou à reflexão sobre o uso do vidro na arquitetura (ANDREOTTI, 2003) e a necessidade de explorar fontes de energia renováveis para aquecimento, resfriamento, iluminação e ventilação dos edifícios. A partir deste momento, a indústria investiu no desenvolvimento de vidros duplos e isolantes, seletivos, difusores de luz, insuflados, entre outras inovações. Ao mesmo tempo, muitos arquitetos se dedicaram a projetar edifícios aproveitando da energia solar, da ventilação e iluminação naturais.

O envelope promove grande parte do desempenho ambiental do edifício, e o desempenho geral dos elementos envidraçados pode ser aprimorado quando são projetados como parte de um sistema completo de fachada. Assim, promoverá maior conforto para seus ocupantes, produtividade, reduzindo os custos operacionais, contribuindo para a saúde do planeta ao minimizar o consumo de energia geral e os relacionados impactos ambientais. O projeto destas fachadas deverá, portanto, objetivar uma série de aspectos (LEE, *et al.*, 2002):

- Maior proteção solar e controle das taxas de refrigeração artificial aliadas à melhora do conforto térmico e suprimento da maior parcela de iluminação naturalmente.
- Melhora da qualidade do ar interno e redução das taxas de refrigeração usando estratégias de ventilação natural, empregando a fachada como um artifício ativo de controle do ar.
- Redução dos custos operacionais minimizando o uso de iluminação artificial, de ar condicionado e de energia para aquecimento equacionando as potencialidades e problemas decorrentes da iluminação natural, radiação solar e ventilação natural.
- Melhoria da qualidade ambiental interna a fim de promover ambientes saudáveis, confortáveis e produtivos.

O projeto de fachadas deve, ainda, para atingir estes objetivos, respeitar as limitações climáticas, localização, orientação solar, acústica e proteção contra incêndios, entre outros. Este é o grande desafio que se apresenta aos projetistas ao optarem por repetir a tendência dos edifícios comerciais envidraçados, em locais onde as condições climáticas não favorecem estes modelos, e levam a altos consumos energéticos para permitir sua ocupação com conforto e produtividade. Segundo Lee *et al.* (2002), as fachadas devem responder e

adaptar-se dinamicamente à variabilidade das condições climáticas e necessidades de seus ocupantes. Os autores acreditam que, quando adequadamente planejadas como componentes de uma solução integradora do projeto do edifício, as fachadas de *design* avançado promovem soluções para muitos dos desafios em projetos de edifícios contemporâneos.

O desejo por esta arquitetura leve, baseada na transparência conferida pelo uso de planos envidraçados, deverá, contemporaneamente, responder às questões da sustentabilidade dos edifícios. A escolha pelo sistema de fachadas duplas ventiladas, por alguns arquitetos, busca aliar este desejo com a responsabilidade ambiental para uma arquitetura mais sustentável.

2.1.1 A evolução do uso das fachadas envidraçadas no Brasil

O objetivo da análise da evolução do uso de sistemas de fachadas pretende fornecer um panorama da prática usual de elementos e materiais nos edifícios brasileiros e, por consequência, na cidade de Curitiba.

A fachada cortina apresenta-se como um invólucro transparente característico da contemporaneidade arquitetônica usualmente presente nos edifícios corporativos. Nas décadas de 40 a 70 do século passado, arquitetos como Mies van der Rohe e Gordon Bunshaft já utilizavam em seus projetos amplas fachadas envidraçadas. Nas últimas décadas, a capacidade de vedação, os métodos de fixação, os materiais utilizados nos componentes evoluíram, assim como o tempo de instalação diminuiu. A produção em série proporcionou maior uniformidade e qualidade ao sistema (NAKAMURA, 2008).

A fachada cortina é definida como um sistema de vedação vertical formado por placas ou painéis fixados externamente por uma subestrutura auxiliar, revestida com vidro ou outros materiais, como a pedra. A primeira aplicação do sistema no Brasil ocorreu nos anos 70, no projeto do arquiteto Harry Cole para o Centro Cândido Mendes no Rio de Janeiro. A fachada caracterizava-se por vidro encaixilhado por perfis de alumínio, e as colunas de sustentação dos quadros ficavam aparentes.

Alguns anos depois, a técnica evoluiu para o sistema de pele de vidro, onde as colunas da subestrutura se voltam para o interior do edifício e a área visível do alumínio pôde ser minimizada. Com isso, as fachadas tornaram-se mais neutras, sem elementos marcantes horizontais ou verticais. O vidro permanecia encaixilhado, mas as folhas móveis eram instaladas sem marcar o plano envidraçado.

O sistema *structural glazing*, desenvolvido na década de 1980, em Miami, nos Estados Unidos, foi criado em resposta à demanda dos arquitetos de eliminar a presença de perfis de alumínio visíveis externamente. O vidro passa a ser o elemento definidor da estética, ao ser fixado na face externa dos caixilhos, através do uso de silicões estruturais. Apesar da evolução técnica deste sistema, seu uso não proporciona boas condições de conforto térmico para o edifício. Com uma maior extensão de vidro na fachada, o desempenho térmico do sistema está diretamente associado às características dos materiais utilizados e o uso de perfis com barreira de fluxo térmico (NAKAMURA, 2008). O *structural glazing* depende do uso de vidros refletivos, laminados ou duplos com persiana interna para garantir algum isolamento térmico e economia de energia.

Os módulos unitizados passaram a ser adotados no final dos anos 1990. O conceito, desenvolvido por projetistas americanos, consiste em painéis pré-fabricados independentes estruturados que reúnem todos os elementos de um módulo da fachada, isto é, caixilhos, subestrutura, folhas móveis, etc. Com isso, reduz-se o tempo de execução e há melhoria na qualidade da execução. Outro sistema que surgiu nesta década foi a fachada suspensa, onde o vidro, autoportante, é fixado por elementos constituídos por rótulas e hastes estruturadas por colunas metálicas ou cabos de aços.

A evolução ao longo do tempo destes sistemas responde a requisitos de melhorias no seu desempenho técnico, de qualidade, durabilidade, resultado estético e de execução. No entanto, a introdução de requisitos que melhorem o conforto térmico e economia de energia ainda precisa evoluir, incorporando “dispositivos para controlar a transferência de calor entre o meio externo e os ambientes internos (...), controlar a acústica, aproveitar a iluminação natural e principalmente utilizar a ventilação natural” (NAKAMURA, 2008).

O desejo de obter certificação LEED tem levado muitos arquitetos a buscar alternativas de fachadas que resultem em melhoria do desempenho energético do edifício. Um exemplo desta tendência é o edifício Cidade Nova (FIGURA 2.1), situado em uma região central do Rio de Janeiro. Este foi construído utilizando o sistema de fachadas duplas, e representa o único caso levantado pela pesquisa bibliográfica com uso do sistema no Brasil. O projeto é da equipe do arquiteto Ruy Rezende, e foi concluído em 2008. Os objetivos do uso da fachada dupla neste edifício são: manter a transparência da fachada, reduzir a incidência solar nos ambientes internos, redução do uso de ar condicionado e garantia de maior isolamento acústico (SILVA E PAIVA, 2008).

As fachadas duplas, compostas de vidros transparentes e de baixa emissividade, foram colocadas nas áreas dos escritórios voltadas para o norte e oeste. A distância entre peles é de sessenta centímetros. A face externa é uma pele de vidro, enquanto a interna é segmentada entre vãos. Segundo Silva e Paiva (2008), os arquitetos desejavam luz natural nos interiores, mas com vidros que não tivessem reflexão luminosa, não fossem escuros e apresentassem elevado coeficiente de sombreamento.



Figura 2.1. Edifício Cidade Nova. FONTE: SILVA E PAIVA, 2008

Segundo a equipe técnica de consultoria, o uso do sistema promoverá redução de 50% com os gastos com ar condicionado, porém não é citado o caso de referência de comparação de desempenho ou dados de medições no local para comprovar esta afirmação. O projeto e construção deste edifício denotam o interesse do uso do sistema de fachadas duplas ventiladas pelos arquitetos brasileiros.

2.2 As fachadas duplas ventiladas

Poirazis (2004) relata que, principalmente na Europa, o uso de fachadas duplas ventiladas nos edifícios, apesar de não ser uma inovação recente, tomou a forma de tendência impulsionada por vários fatores, entre eles o desejo estético por fachadas envidraçadas e transparentes, a necessidade prática de ambientes internos de maior qualidade, melhoria do desempenho acústico das envoltórias em edificações situadas em áreas de grande poluição sonora e redução nos gastos de energia durante a etapa de ocupação da construção. Nesta

seção são apresentadas as definições do sistema de fachada dupla ventilada, os componentes do sistema e palavras chaves.

2.2.1 Conceito do sistema de fachada dupla ventilada

Na literatura científica são encontradas diversas definições do sistema de fachadas duplas, complementares umas às outras. Na sequência são apresentados os principais conceitos desenvolvidos por autores selecionados, a fim de definir especificamente o objeto deste estudo.

Segundo Arons (2000), o uso de fachadas duplas pelos edifícios representa uma evolução tecnológica com o intuito de minimizar os ganhos solares incidentes sobre as fachadas largamente envidraçadas sem o uso de proteções solares externas. Este sistema compõe-se, na definição colocada pelo autor, por pelo menos duas membranas ou peles entre o espaço interno ocupável e o ambiente externo, conformando um canal para movimentação do ar. Este aspecto, a passagem intencional e controlada do ar nesta cavidade intermediária, diferencia a tecnologia das fachadas com vidro duplo ou triplo, já que os mecanismos térmicos e os impactos sobre o consumo energético e conforto dos ocupantes comportam-se de forma distinta de fechamentos convencionais. O movimento do ar no espaço intersticial entre as membranas alteram e dominam as características do desempenho do envoltório.

De acordo com o Belgian Building Research Institute - BBRI (2002), o sistema é uma fachada que cobre um ou mais pavimentos de um edifício, composta de várias camadas, onde as peles podem ser estanques ou não à entrada do ar. Neste último caso, a cavidade entre as camadas pode ser naturalmente ou mecanicamente ventilada, e a estratégia da ventilação desta pode mudar ao longo do tempo, enquanto equipamentos e sistemas podem ser integrados de forma a promover a climatização dos ambientes através de técnicas passivas ou ativas.

Já segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), essencialmente um par de peles de vidro separadas por um corredor de ar (a cavidade intermediária), as fachadas duplas ventiladas são baseadas na noção de fechamentos externos com a característica de responder dinamicamente à variação das condições ambientais do local de um edifício, incorporando elementos de sombreamento integrados, ventilação natural e estratégias de isolamento térmico para tanto. O espaço de ar entre as membranas de vidro configuram uma camada isolante contra temperaturas extremas, ventos e som.

A definição da fachada dupla ventilada apresentada por Saelens (2002), apesar de semelhantes às anteriores, inclui três aspectos para diferenciar o sistema de outras tecnologias construtivas:

- A relação com o envelope dos ambientes ocupáveis, excluindo assim os átrios, estufas ventiladas e corredores envidraçados.
- A transparência das camadas ou peles, excluindo as *trombe walls* e fachadas ventiladas opacas.
- O fluxo de ar na cavidade, excluindo as janelas de vidro duplo ou triplo e estruturas transparentes estanques.

Poirazis (2004) apresenta a definição do sistema de forma mais completa:

“A fachada dupla ventilada é um sistema que consiste de duas peles envidraçadas instaladas de forma a permitir o fluxo do ar na cavidade intermediária. A ventilação da cavidade pode ser natural, mecânica ou artificial. À parte do tipo de ventilação na cavidade intermediária, a origem e destino do ar podem ser diferentes dependendo principalmente das condições climáticas, do uso, da localização, do período de ocupação do edifício e da estratégia de HVAC. As peles envidraçadas podem ser de vidro simples ou laminado, com uma distância entre elas variando de 20 centímetros a 2 metros. Frequentemente, para proteção e extração do calor durante o período de resfriamento, recursos de sombreamento são colocados no interior da cavidade. (POIRAZIS, 2004)”.

Ainda de acordo com Poirazis (2004), as propriedades solares das fachadas duplas são semelhantes às fachadas simples. No entanto, com a adição de camadas, a zona térmica de transição (*thermal buffer zone*) formada reduz as perdas de calor e propicia ganhos solares passivos. Duas possibilidades se apresentam: durante o período do inverno, o ar pré-aquecido na cavidade pode ser insuflado para o interior do edifício, promovendo ventilação natural sem perder condições de conforto. No verão, a cavidade deve ser adequadamente ventilada a fim de evitar problemas de superaquecimento do espaço intersticial e consequente aumento indesejável da temperatura interna. Este assunto será retomado adiante quando o funcionamento das fachadas duplas ventiladas for descrito em detalhe.

Uma distinção importante neste estudo diz respeito ao uso de ventilação na cavidade intermediária. O sistema com esta característica passa a ser designado como **fachada dupla ventilada** ou **FDV**, caracterizando o uso da ventilação do espaço intersticial de forma intencional e controlada, através de aberturas para o exterior ou ventiladores. Como será visto

adiante, na seção que discorre sobre a classificação do sistema, esta diferenciação altera substancialmente o desempenho da fachada. Os termos fachada de dupla pele ou simplesmente fachada dupla, referem-se genericamente ao sistema, podendo designar também as fachadas com a cavidade estanque à entrada ou saída de ar.

2.2.2 Componentes da fachada dupla

Quanto à estrutura, segundo o Streicher (2005), as FDV apresentam os seguintes componentes (FIGURA. 2.2):

- Pele externa: geralmente totalmente envidraçada.
- Pele interna: geralmente apresenta partes opacas e transparentes (janelas). Quando a fachada é ventilada naturalmente, o vidro da pele interna geralmente é isolante.
- Cavidade intermediária, que é o espaço entre as duas peles. Pode ser ventilada naturalmente ou mecanicamente, variando de 20 centímetros a 2 metros de profundidade.
- Aberturas internas, que são janelas operáveis pelos usuários, permitindo ventilação natural para os ambientes.
- Componentes de sombreamento integrados à cavidade intermediária.

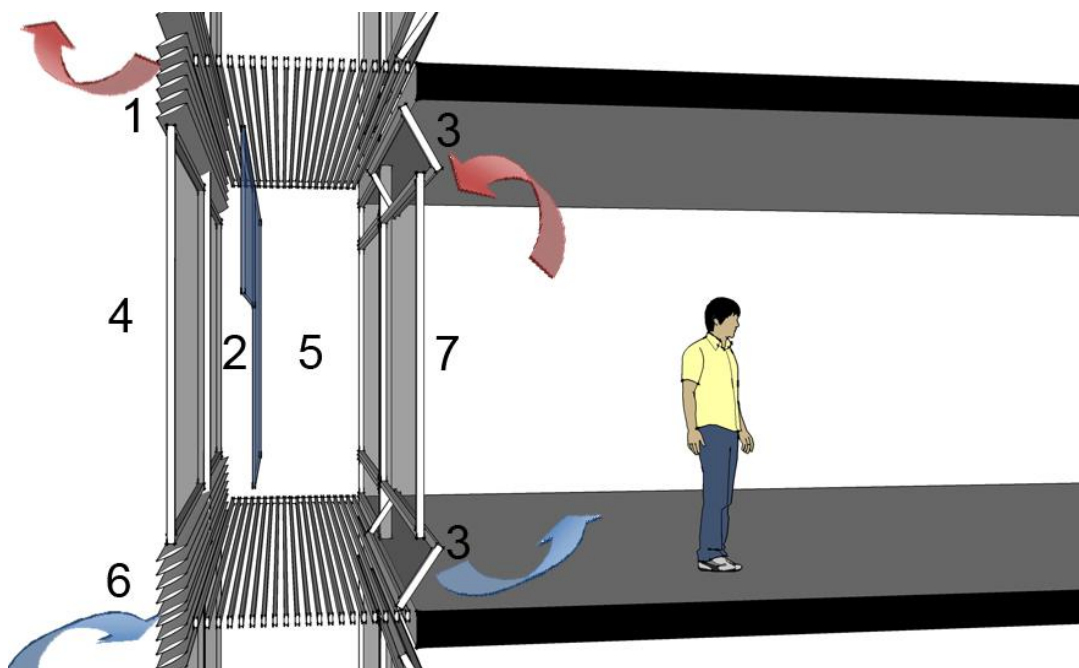


Figura 2.2. Os componentes da fachada dupla ventilada. As setas em vermelho indicam ar quente e as azuis ar frio.

1 – Abertura para exaustão do ar para o exterior. 2 – Dispositivo de sombreamento. 3 – Janela operável interna. 4 – Pele externa. 5 – Cavidade intermediária. 6 – Abertura para insuflamento do ar externo. 7. Pele interna

2.2.3 Palavras chaves

O sistema de fachadas duplas recebe diversos nomes na literatura específica. O quadro abaixo relaciona os termos traduzidos livremente da relação de palavras-chave apresentada em Poirazis (2004).

Key words	Palavras-chave
<i>Double-Skin Façade</i>	Fachada dupla ventilada
<i>Active Façade</i>	Fachada ativa
<i>Passive Façade</i>	Fachada passiva
<i>Double Façade</i>	Fachada dupla
<i>Double Envelope (Façade)</i>	Duplo envelope (fachada)
<i>Dual-Layered Glass Façade</i>	Fachada de vidro com duas camadas
<i>Dynamic Façade</i>	Fachada dinâmica
<i>Environmental Second Skin System</i>	Sistema ambiental de segunda pele
<i>Energy Saving Façade</i>	Fachada economizadora de energia
<i>Ventilated Façade</i>	Fachada ventilada
<i>Double-Leaf Façade</i>	Fachada de dupla folha
<i>Energy Saving Façade</i>	Energy Saving Façade
<i>Environmental Façade</i>	Fachada ambiental
<i>Multiple-Skin Façades</i>	Fachada de múltiplas peles
<i>Intelligent Glass Façade</i>	Fachada inteligente de vidro
<i>Second Skin Façade/System</i>	Sistema de segunda pele
<i>Airflow Window</i>	Janela de fluxo de ar
<i>Supply Air Window</i>	Janela de insuflamento de ar
<i>Exhaust Window/Façade</i>	Fachada/ janela de exaustão
<i>Double Skin Curtain Wall</i>	Fachada cortina de dupla pele
<i>Twin Skin Façade</i>	Fachada de pele duplas

Figura 2.3. Designações do sistema na literatura científica.

O presente estudo utilizará das expressões fachada dupla ventilada ou FDV ao se referir ao sistema.

2.3 Evolução histórica da fachada dupla ventilada

Os problemas decorrentes de grandes áreas envidraçadas nos edifícios foram percebidos já no século XIX. Segundo Braham (2005), Jean-Baptiste Jobar, diretor do Industrial Museum em Bruxelas, em 1849, propôs que o ar entre panos de vidro pudesse ser aquecido ou resfriado intencionalmente e assim modificar o comportamento das grandes fachadas envidraçadas. Esta descrição configura uma primeira versão de fachada dupla ventilada mecanicamente.

De acordo com Crespo, citado por Poirazis (2004), o sistema foi utilizado pela primeira vez em 1903, em Glengen, na Alemanha, no edifício Steiff Factory. O objetivo do projeto era maximizar o aproveitamento da luz natural, considerando, no entanto, o clima frio e fortes ventos da região. A proposta constituía uma estrutura de três pavimentos com o primeiro pavimento utilizado para depósito, e os pavimentos superiores para escritórios. A

experiência foi um sucesso, e duas edificações foram ampliadas em 1904 e 1908 com o mesmo sistema de dupla pele. Estes edifícios ainda estão em uso.

Le Corbusier pode ser apontado como um dos pioneiros do uso do sistema na história da arquitetura moderna, com o desenvolvimento das chamadas paredes neutras ou *mur-neutralisant* (BRAHAM, 2005). O primeiro projeto a utilizar desta ideia, a Villa Schowb, de 1916, construída nos Alpes suíços, previa a inserção experimental de tubos para aquecimento entre os panos de vidro. Em 1927, o arquiteto realizou em totalidade sua invenção com a *Double House* em Weissenhof Seidlung, Stuttgart. As *murs neutralisants* consistiam de duplas membranas em vidro, ou outros materiais, com espaço de alguns centímetros entre elas, para insuflamento de ar aquecido, para climas frios, ou gelado, para o calor, de forma a manter os ambientes sempre na faixa de conforto para seus usuários. Em 1931, Le Corbusier construiu, com a Saint Gobain, uma célula teste do sistema que os levou à conclusão de que, apesar da sensação de conforto ser potencializada, havia aumento de uso de energia.

Nos anos 1950, na Escandinávia, foi desenvolvido um sistema de fachada dupla com o princípio de extração mecanizada do ar da cavidade, para melhorar o desempenho dos fechamentos envidraçados especialmente em situações extremas de frio. Utilizando de panos de vidro duplos ou triplos, o objetivo do sistema era manter a temperatura do vidro interno com temperatura próxima ao do ambiente, condicionado artificialmente. Assim, o desconforto relacionado à assimetria por radiação nestas condições extremas era minimizado.

O sistema tem sido utilizado desde então, no entanto, pouco progresso ocorreu no seu desenvolvimento tecnológico até o final dos anos 70 e início dos anos 80, com grande retomada nos anos 90. O foco para o uso do sistema para eficiência energética iniciou nos anos 1970. Como exemplo desta época, pode-se citar o projeto do edifício norte americano Occidental Chemical Company, construído em Niagara Falls em 1980. Neste período as fachadas começaram a ser diferenciadas pelo tipo de ventilação adotada, se natural (*design* passivo) ou mecânica (*design* ativo).

2.3.1 Os anos 1990

Dois fatores influenciaram a retomada da tipologia com intensidade nos anos 90: o maior comprometimento dos profissionais com projetos que demonstrassem preocupação com o meio ambiente e a demanda por edifícios mais sustentáveis, que passaram a ser uma boa

imagem para arquitetura corporativa (POIRAZIS, 2004). Marcada por intenso experimentalismo na arquitetura, a chamada *eco-tech architecture* foi amplamente difundida neste período (CASTELNOU, 2002), defendendo o uso de alta tecnologia e informática para a obtenção de conforto, redução de gastos energéticos e dos impactos ambientais das construções.

A primeira fachada dupla com a cavidade naturalmente ventilada, segundo Andreotti (2003), é o edifício, do escritório Foster and Partners, Business Promotion Center em Duisburg, Inglaterra, de 1993. Neste, o ar é insuflado na base da cavidade, ascendendo pelo efeito chaminé removendo o calor junto à fachada interna até o topo, onde é expelido. No entanto, o condicionamento dos ambientes é feito por sistema de ar condicionado, não sendo possível a abertura de janelas para permitir ventilação natural.

Ao longo da década, as fachadas duplas proliferaram no norte da Europa, com destaque para o desenvolvimento e refinamento da tipologia *natural twin-face*, enfatizando a ventilação natural direta dos ambientes e desempenho acústico. O projeto das Galeries Lafayette em Berlim, de 1995, do arquiteto Jean Nouvel, é um dos primeiros exemplos do uso do sistema com possibilidade de ventilação dos ambientes de forma natural, assim como no edifício da empresa de fornecimento de energia elétrica alemã RWE Tower, em Essen, Alemanha, do escritório Ingenhoven Overdiek, de 1997.

Este edifício se destaca como um caso de sucesso da implantação do sistema. Pasquay (2004), avaliou o desempenho energético de três edifícios com fachadas duplas ventiladas, através do monitoramento das condições de temperatura no seu interior durante o período de ocupação, por um ano, entre eles o RWE Tower. Segundo Lee *et al.* (2002), o projeto foi direcionado pelo desejo dos clientes para otimização do uso da iluminação e ventilação naturais, além de proteção solar. Estas solicitações resultaram em um sistema de fachada transparente interativo que envolve todo o edifício. São 28 pavimentos de escritórios, climatizados por meio de *concrete core cooling*³ e ar condicionado. As janelas podem ser abertas, e quando isto acontece os sistemas de condicionamento artificiais desligam automaticamente. O pano exterior constitui-se de vidro transparente de 10mm, e a fachada interna, do piso ao teto, de portas corrediças de vidro duplo que podem ser abertas pelos ocupantes. A cavidade da fachada dupla, segmentada em módulos ou boxes, tem 50 centímetros de profundidade. Esta é ventilada por aberturas horizontais de 15 centímetros na

³ Exposição da massa térmica das lajes de concreto para melhor desempenho da ventilação natural.

base e no topo do módulo, para circulação do ar externo. Persianas retráteis foram posicionadas junto ao pano interior. Internamente são usadas rolôs para evitar ofuscamento. Desta forma, o aproveitamento da iluminação natural, radiação solar direta e ofuscamento podem ser controlados conforme a necessidade do usuário. No inverno, o ar aquecido da cavidade pode ser recuperado insuflado para os ambientes internos. O uso da dupla pele confere ao edifício maior isolamento no inverno, para minimizar as perdas de calor, e efetiva proteção solar para o verão.

No estudo de Pasquay (2004), foram selecionados dois ambientes para monitoramento, um na face norte e outro na face sul do prédio. Na maior parte do ano de medição, os equipamentos de condicionamento não foram acionados, e as temperaturas internas não ultrapassaram os 28° C.

Na Alemanha, muitos edifícios têm sido construídos utilizando este sistema, em conjunto com constantes pesquisas para o aprimoramento do desempenho das fachadas duplas ventiladas, tornando-se símbolos de inovação arquitetônica e tecnológica. São exemplos destes edifícios: Commerzbank, em Frankfurt (Norman Foster and Partners); o Düsseldorfer Stadttor (do escritório Petzinka Pink Architects) e o ARAG Insurance (arquitetura RKW em colaboração com Norman Foster), em Düsseldorf; o novo edifício administrativo do Deutsche Messe AG em Hannover e o Debis (Renzo Piano Building Workshop em colaboração com Christoph Kohlbecker) e GSW Headquarters (arquiteto Sauerbruch Hutton) em Berlim.

O Debis Building, de 1997, edifício de escritórios de 21 pavimentos projetado por Renzo Piano como parte da revitalização da Potsdamer Platz, em Berlim, se destaca enquanto solução com alta tecnologia envolvida (FIGURA 2.4).



Figura 2.4. Debris Building, de 1997. FONTE: MELET, 1999.

O envoltório da torre consiste em um pano composto de aletas móveis de vidro laminado automatizadas, enquanto o pano interno compõe-se de esquadrias operáveis pelos usuários com peitoril em painéis isolantes. A fachada oeste recebeu externamente, em vez de vidro, elementos em terracota fixados por estrutura de alumínio, os quais permitem a gradação da transparência conforme a necessidade. Nos dias frios, com as aletas externas fechadas, a infiltração do ar é mínima, garantindo o maior isolamento da fachada contra perdas de calor, e as janelas internas podem ser abertas para admitir o calor armazenado pela cavidade em dias ensolarados. Nos dias quentes, as aletas são abertas para maior circulação do ar para a ventilação natural do edifício, ajustadas pelos ocupantes conforme sua vontade. Considerado uma tipologia híbrida de fachada dupla, a cavidade é segmentada por pavimento. A ventilação noturna da massa térmica é automatizada. O edifício pode ser ventilado naturalmente por cerca de 50% do tempo de ocupação, nos andares altos, e 60% nos andares mais baixos. A ventilação mecânica é acionada nos picos de dias frios ou quentes (LEE *et al.*, 2002 e POIRAZIS, 2004). As vantagens apontadas com relação a outras fachadas duplas são: o controle individual das condições ambientais internas pela operação das aberturas por conta do usuário; a gradação da transparência com a alternância entre elementos de vidro e de

cerâmica, permitindo maior coerência com seu entorno urbano assim como maior controle dos ganhos internos por radiação solar; a manipulação das aletas exteriores e a presença de persianas internas reduzem o ganho de calor, ofuscamento e demanda por ar condicionado. Como desvantagens, são relacionadas os altos custos de manutenção e limpeza dos elementos envidraçados e o custo da automação do sistema.

Alguns edifícios são apontados como a última geração do desenvolvimento e aplicação do sistema de fachadas duplas, entre eles o Aurora Place, em Sidney, projetado pelo arquiteto Renzo Piano. Segundo Sayegh (2008), a tipologia de fachada dupla ventilada que percorre verticalmente toda a fachada do edifício de forma contínua, com aberturas na base e junto ao topo do mesmo, tem sido substituída por sistemas onde a dupla fachada é subdividida por pavimento, como nos exemplos citados. No modelo contínuo, a ventilação da cavidade muitas vezes não é suficiente para evitar o acúmulo de calor nos andares superiores de edifícios altos.

2.4 Porque usar fachadas duplas ventiladas

As fachadas duplas ventiladas são largamente utilizadas na Europa, com exemplos significativos também nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e China, associadas principalmente a edifícios comerciais, sedes de empresas públicas ou privadas.

O propósito frequente do uso das FDV, segundo Blomsterberg (2007), é a redução das altas temperaturas no interior dos edifícios, no verão, e reduzir as perdas de calor durante o inverno. Edifícios com FDV podem incorporar as estratégias de ventilação natural, iluminação natural e ganho de calor solar, como elementos chaves para a obtenção de conforto e desempenho ambiental. Outros benefícios potenciais podem ser associados ao uso de fachadas duplas ventiladas: criação de zona de transição térmica, proteção contra ventos fortes para abertura das janelas, proteção contra incêndios, estética, isolamento acústico, ventilação noturna natural e espaço para instalação de células fotovoltaicas.

Devido à multiplicidade de configurações possíveis e a complexidade das variáveis envolvidas, a implementação do sistema de FDV em um edifício deve ser estudada intensamente, a fim de prever seu comportamento nos diversos parâmetros a serem atingidos, e a partir disto definir as características construtivas que o sistema deve apresentar para assegurar seu correto funcionamento ao longo do ano e evitar que efeitos contrários aos desejados aconteçam. Como este sistema é fortemente dependente das condições externas

(como a radiação solar e temperatura externa), já que estas influenciam o clima interno, deve ser projetado considerando as particularidades de seu contexto e orientação da fachada, de outra forma o desempenho não será satisfatório.

As fachadas duplas ventiladas configuram um envoltório climaticamente ativo, diferente de fechamentos convencionais (STREICHER, 2005). As potencialidades do seu uso como componente do sistema de energia do edifício, aperfeiçoamento do conforto ambiental, aumento do uso da iluminação natural, posicionamento dos artifícios de sombreamento e redução da poluição sonora, tornam esta tipologia de fachadas tanto um meio de expressão arquitetônica como solução tecnológica integrante do funcionamento global do edifício. Desta forma, a abordagem projetual deve ser holística, com a colaboração de todos os envolvidos no planejamento do edifício, arquitetos, engenheiros, consultores e fornecedores.

Na sequência serão apresentadas as vantagens do uso do sistema conforme as fontes bibliográficas consultadas. Várias vantagens do uso do sistema já foram apresentadas ao longo do texto. O propósito desta seção é sistematizar em tópicos estes benefícios, a fim de propiciar uma visão ampla das razões que podem levar projetistas e clientes a optarem pela tecnologia.

2.4.1 Ventilação natural

De acordo com Poirazis (2004), a ventilação natural é uma das principais vantagens das fachadas duplas ventiladas. Para promover o uso da ventilação natural para os ambientes internos, diferentes tipos do sistema podem ser aplicados de acordo com a localização, clima e orientação do edifício. A seleção do tipo da FDV é fundamental para a manutenção das temperaturas internas, controle da velocidade e da qualidade do ar. Projetado corretamente, o uso da ventilação natural pode levar à redução do consumo de energia relacionado à ocupação do edifício e melhorar as condições de conforto dos ocupantes. Isto se dá por que, por ser tratar de uma estratégia passiva, as demandas de energia para resfriamento artificial são minimizadas.

Lee *et al.* (2002) relacionam as formas como a ventilação natural pode ser utilizada pelos edifícios com fachadas duplas ventiladas:

- a) Através de janelas operáveis na pele interna, a ventilação ocorre pela circulação do ar na cavidade provocada pelo vento ou pela convecção (ou efeito chaminé), e pode ser unilateral ou cruzada.

- b) A ventilação natural da cavidade pode usar de recursos diferentes de aberturas para o exterior, de forma a reduzir a velocidade de entrada do ar e aumentar sua exaustão.

Segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), o pano exterior da fachada dupla cria uma camada de ar adjacente ao edifício não afetada pela alta velocidade dos ventos, permitindo assim o acesso dos ocupantes ao controle das aberturas para resfriar e ventilar o ambiente, mesmo em andares mais altos e em locais sujeitos a ventos turbulentos. Em dias muito quentes, o pano exterior também poderá ser aberto para proporcionar maior ventilação deste espaço intersticial e reduzir as temperaturas do ar junto aos fechamentos internos.

Uma típica tipologia de fachada dupla ventilada com bom desempenho de ventilação são as fachadas corredor, com adição de grelhas para ventilação a cada pavimento ou zona individual, segundo Harrison e Meyer-Boake (2003). A compartimentação entre os pavimentos elimina o impacto dos ruídos, fumaças e transferência de calor entre zonas. O uso de venezianas ou telas controla a velocidade da entrada do ar externo, protegendo contra chuva e reduzindo a poluição sonora exterior. É este controle que permite o acesso dos ocupantes à ventilação natural com maior conforto e segurança mesmo em edifícios altos.

Um exemplo deste tipo é o edifício Düsseldorf Stadt, projeto de Petzinka, Pink and Partners em Düsseldorf, Alemanha, de 1997 (LEE *et al.*, 2002). A cavidade de cada compartimento da FDV, do tipo corredor, tem de 90 a 140 centímetros de profundidade e 20 metros do comprimento, com acréscimo de persianas no espaço intersticial, junto ao pano exterior, para maior controle solar. Segundo Poirazis (2004), a ventilação natural da cavidade se dá por aberturas do pano exterior ao nível do piso, para insuflamento, e no topo, para exaustão. Estas aberturas são escalonadas entre as baias para evitar que o ar expelido de uma cavidade seja absorvido pela situada acima. O edifício é totalmente envolvido pela pele de vidro, com um átrio no seu centro com 56 metros de altura. O pano exterior da fachada é de vidro temperado com 12mm de espessura, e o interno, de vidro *low-e* encaixilhado por montantes de madeira. O edifício pode ser naturalmente ventilado por longos períodos ao longo do ano, cerca de 70 a 75% das horas do ano.

Marcondes (2004) conduziu uma pesquisa com o objetivo de comprovar o desempenho ambiental e aplicabilidade de fachadas duplas ventiladas em edifícios altos em São Paulo, através de simulações termodinâmicas e de iluminação. As variáveis investigadas na pesquisa foram a possibilidade do uso de ventilação natural nos escritórios e eficiência da

iluminação natural. Foi verificado que o uso do sistema resultou em um período mais longo de condições de umidade relativa do ar considerado aceitável, em comparação com fachadas simples, desta forma aumentando o desempenho ambiental geral do envoltório. O uso da ventilação natural para condicionamento dos ambientes, de 25% das horas do ano em fechamentos convencionais, aumentou 15 a 25% dependendo do modelo de FDV simulado.

O uso da ventilação natural é considerado, segundo Braham (2005), a maneira mais efetiva de reduzir o consumo energético da operação do edifício. No entanto, Gratia e De Herde (2004-a), em um estudo sobre uso de ventilação natural para edifícios com fachada dupla ventilada do tipo contínuo (sem divisões ao longo da altura do prédio), apontam as dificuldades práticas para o uso da estratégia. Segundo os autores, o funcionamento adequado da mesma é sensível e dependente da orientação, da direção e da proteção do edifício dos ventos, do dimensionamento das aberturas para admissão do ar e da possibilidade de uso de ventilação cruzada. Principalmente nos andares superiores, verificaram que pode haver inversão do fluxo de ar, provocando o insuflamento de ar aquecido e poluído da cavidade para os ambientes em dias ensolarados. Portanto, para uso de ventilação natural nos edifícios com fachada dupla, o projeto deve prever as condições para que a estratégia funcione adequadamente, influenciando as decisões quanto à tipologia adotada e dimensionamento de seus componentes (aberturas internas e externas, profundidade da cavidade, tipo de vidro, entre outros).

2.4.2 Isolamento térmico

Devido à adição da segunda pele, os sistemas de fachadas duplas ventiladas promovem um isolamento térmico maior tanto no inverno como no verão (POIRAZIS, 2004). Durante o período de inverno, a pele adicional externa melhora o isolamento do fechamento pelo aumento da sua resistência aos processos de transferência de calor. Nas fachadas duplas ventiladas, haverá diminuição desta propriedade se as aberturas da cavidade para o exterior permanecerem abertas. Isto pode ser revertido se o sistema permitir o fechamento destas aberturas quando for necessário diminuir as perdas de calor interno. A redução da velocidade do fluxo do ar e o aumento da temperatura do ar da cavidade, pelo efeito estufa, diminuem a taxa de transferência de calor por convecção na superfície do vidro da pele interna, levando à redução da transmissão de calor para o interior, desta forma mantendo melhores condições de conforto junto às áreas periféricas dos ambientes (COMPAGNO, 2002).

Conforme Harrison e Meyer-Boake (2003), este aspecto da zona de transição permite o uso das áreas junto aos fechamentos que usualmente, em envoltórios envidraçados, requerem a utilização de mecanismos artificiais para serem ocupáveis e reduzir o desconforto causado por assimetria térmica. Com o uso de vidros seletivos, no pano interno, é possível minimizar ainda mais os ganhos solares e transmissão de calor da cavidade para os ambientes, sem perda da transparência e aproveitamento da luz natural. Quando necessário, o ar aquecido no interior da cavidade pode ser recuperado para aquecer os ambientes internos.

Durante o verão, ainda segundo Poirazis (2004), a preocupação deixa de ser o isolamento contra as perdas térmicas e passa a ser a extração do calor acumulado na cavidade por convecção. O uso da ventilação natural ou mecânica é fundamental para isto, e depende do correto dimensionamento da geometria da cavidade para promover o fluxo do ar, escolha do tipo de vidro das peles e posicionamento dos elementos de sombreamento intersticiais, evitando assim o superaquecimento deste espaço.

2.4.3 Ventilação noturna natural

De acordo com Lee *et al.* (2002), a ventilação noturna é uma estratégia passiva de resfriamento da massa térmica do interior de um edifício, com efetivos resultados para a redução das necessidades de condicionamento dos ambientes em dias quentes. Esta pode ser usada em climas onde a variação entre as temperaturas diurnas e noturnas é significativa, e com prevalência de vento. Os ganhos de calor gerados durante o dia são absorvidos pela mobília, paredes, pisos e tetos, e devolvidos para o ambiente proporcionalmente à capacidade térmica do material, sendo removidos pela ventilação.

As fachadas duplas ventiladas podem ser projetadas de forma a permitir o uso da estratégia, com as vantagens de segurança patrimonial e proteção contra intempéries, como chuva ou ventos turbulentos. O desempenho será ainda melhor se, durante o dia, os ganhos de calor internos forem controlados pelo uso de proteções solares, por exemplo. No planejamento da fachada, deve-se calcular a ventilação necessária para se obter os resultados pretendidos, considerando que o pano exterior do sistema obstrui parcialmente a entrada do vento noturno nos ambientes. As aberturas da cavidade poderão ser dimensionadas de forma a permitir o fluxo de ar adequado.

Gratia e De Herde (2004-c) desenvolveram um estudo sobre estratégias de ventilação natural, diurna e noturna, em um edifício com fachada dupla ventilada. Em sua

pesquisa, observam que a ventilação noturna é eficaz e menos imprevisível que a diurna. O efeito dominante é dado pelo vento, já que à noite não há incidência de radiação solar que aqueça a cavidade e provoque efeito chaminé. Ainda segundo os autores, o uso da ventilação noturna reduz o consumo de energia para resfriamento dos ambientes durante o dia. Uma observação importante é a segurança patrimonial proporcionada pela fachada dupla, já que as janelas abertas ficam protegidas de intrusão pela segunda pele.

2.4.4 Controle solar

A maneira mais efetiva de evitar que a ação da radiação solar aqueça os ambientes do edifício acima das faixas de conforto é, primeiramente, evitar que o calor inicialmente entre no espaço. Os elementos de sombreamento externos compõem a estratégia mais eficiente de minimizar os ganhos solares em edifícios com grandes áreas envidraçadas, com o uso de brises ou persianas horizontais. Estes permitem que a iluminação natural continue sendo utilizada, assim como mantêm parcialmente as vistas do exterior.

De acordo com Braham (2005), o controle dos ganhos solares nos edifícios com fachadas duplas ventiladas é obtido pelo posicionamento de elementos de sombreamento no interior da cavidade, assim como pela habilidade da cavidade de absorver parte da radiação incidente. Estes elementos de proteção solar, tipicamente compostos de lâminas horizontais, podem ser fixos ou retráteis, controlados pelos ocupantes ou por automação, conferindo ao edifício a adaptabilidade desejada pela variação das condições climáticas externas. O papel destes recursos de sombreamento, segundo Arons (2000), é absorver ou refletir a radiação indesejada. O calor absorvido pelo elemento pode ser removido da cavidade pela circulação do ar.

No período de aquecimento, a incidência de radiação solar direta pode ser desejável, assim como o aquecimento da cavidade anexa aos ambientes. Desta forma, os dispositivos de sombreamento devem ser retráteis, permitindo que sejam abertos ou fechados conforme a necessidade. O espaço da cavidade e a integração de elementos para sombreamento controlam os ganhos por radiação solar que usualmente são solucionados com sistemas mecânicos de ar condicionado e extração do ar.

2.4.5 Proteção dos elementos de sombreamento

Conforme coloca Poirazis (2004), pode-se tirar proveito da estanqueidade da cavidade quanto aos agentes naturais para posicionar os componentes de sombreamento da fachada. Desta forma, a conservação desses elementos é maior, pois estarão abrigados das chuvas, ventos e poluição, reduzindo a necessidade de manutenção que os elementos posicionados externamente demandam.

2.4.6 Isolamento acústico

De acordo com Poirazis (2004), o isolamento acústico pode ser uma das razões mais importantes para usar uma fachada dupla ventilada. A redução dos níveis de ruído no interior de um edifício pode ser alcançada pela diminuição da transmissão entre ambientes (poluição sonora interna) e da transmissão a partir de fontes exteriores (poluição sonora externa). O tipo de fachada e o número de aberturas pode ser crítico para o isolamento sonoro interno e do ruído externo. Arons (2000) também relaciona o isolamento acústico potencial do uso da fachada dupla ventilada com seus detalhes construtivos específicos e forma de operação. Por não ser o foco deste estudo, este assunto não será desenvolvido em profundidade.

2.4.7 Controle e conforto dos ocupantes

A temperatura da superfície interna de uma fachada influencia a sensação de conforto experimentada pelos ocupantes de um edifício. No período do verão, esta superfície pode ser uma fonte de radiação infravermelha, e um caminho para perda de calor no inverno. O desconforto percebido, causado pelo efeito da assimetria térmica⁴, pode ocorrer mesmo quando as temperaturas internas estão na zona de conforto (ARONS, 2000).

Durante o período de aquecimento, com o ar no interior da cavidade da FDV mais quente que o ar externo, a superfície interior da fachada pode manter a temperatura radiante mais próxima aos níveis conforto térmico, em comparação com as fachadas simples (POIRAZIS, 2004). Por outro lado, durante o verão é muito importante que o sistema seja bem projetado, para que o superaquecimento no interior da cavidade não provoque o aumento da temperatura da pele interna e a transmissão de calor indesejado para o interior. Os

⁴ A exposição de uma pessoa a um campo assimétrico de radiação é uma fonte de desconforto. A ISO 7730 impõe como regra necessária para conforto térmico, relacionadas com os parâmetros de conforto, que a assimetria da temperatura radiante de janelas ou outra superfície vertical fria deve ser inferior a 10°C que a temperatura do ambiente.

dispositivos de sombreamento representam um recurso importante para minimizar este problema.

No entanto, segundo Arons (2000), o principal efeito do uso das fachadas duplas ventiladas, com relação à melhora do conforto dos ocupantes, relaciona-se ao controle individual das condições ambientais. Isto é representado pela possibilidade da movimentação dos dispositivos de sombreamento posicionados na cavidade e abertura intencional de janelas de acordo com a vontade do usuário.

2.4.8 Iluminação natural

De acordo com Harrison e Meyer-Boake (2003), a iluminação natural em ambientes de trabalho assume duas funções: reduzir o consumo de iluminação artificial e melhorar sua qualidade, já que o uso da luz do dia é preferível, por sua variação e reprodução de cores. Boa iluminação interna é considerada um dos principais fatores para o conforto ambiental, influenciando tanto a saúde física e mental quanto a produtividade dos ocupantes. As fachadas duplas ventiladas, com fechamentos envidraçados, aprimoram o acesso à luz natural. Este aumento do aproveitamento desta iluminação pode levar ao ofuscamento e aumento do calor em determinados períodos do dia, que devem ser considerados para o planejamento dos dispositivos de sombreamento.

2.4.9 Economia de energia e redução dos impactos ambientais

Edifícios com fachadas duplas ventiladas podem ser eficientes energeticamente, quando propriamente projetadas para tanto (POIRAZIS, 2004). Economia significativa de energia pode ser alcançada quando é possível operar as janelas para ventilação natural dos ambientes, ou aumentar o período em que a ventilação natural pode ser explorada, minimizando o uso de fontes de condicionamento artificiais. Segundo Arons (2001), a economia de energia atribuída às FDV também são em função da minimização de carga solar no perímetro dos edifícios, resultante da redução do fator solar, da redução das trocas térmicas com o exterior e do uso de dispositivos de sombreamento.

A economia no consumo de energia operacional é um elemento importante na realização de edifícios mais sustentáveis, assim como a conservação dos recursos naturais, a limitação do uso da água, a reutilização e a reciclagem de materiais ou componentes, bem como a limitação da geração de resíduos também após a demolição. Para avaliar o impacto

ambiental de um edifício a partir de um indicador de desempenho, a análise do ciclo de vida de uma edificação (ACV ou LCA⁵) é um instrumento adequado.

As FDV requerem mais *inputs* ou entradas⁶ do que uma solução convencional: aumento da área do pavimento pelo acréscimo do espaço da cavidade, maior uso de recursos e de energia na sua construção, aumento no tempo de construção, entre outros (BLOMSTERBERG, 2007). A fim de realizar uma solução com um impacto ambiental reduzido, as entradas adicionais durante a produção e construção precisam ser compensadas por uma diminuição significativa nas saídas durante o uso e fase de demolição do edifício. Para as FDV, isto pode ser atingido pelo fato de que podem reduzir a energia de condicionamento e de iluminação, ou pela melhoria de outros aspectos como a manutenção menos frequente dos dispositivos de sombreamento. A padronização da fachada, pela repetição de módulos, também pode levar à eficácia do uso de recursos para a construção e facilidade de manutenção, no caso da necessidade de substituição ou atualização de seus componentes.

2.4.10 Estética

O uso de fachadas duplas possibilita a construção de edifícios transparentes e de aparência leve, indo ao encontro do desejo de muitos arquitetos contemporâneos. A opção pelo sistema pode estar atrelada a um desejo de solução estética. Segundo Arons (2000), com a instalação dos dispositivos de sombreamento, os fechamentos podem utilizar vidros com alto índice de transparência, chamados de vidros brancos. Estes apresentam transparência para luz visível maior que os vidros convencionais, melhorando também a qualidade da luz refletida e transmitida.

O edifício Helicon (FIGURA 2.5), localizado em Londres, projeto de Shepard Robson, é citado pelo autor como um exemplo notável de transparência de fachada. Os fechamentos são completamente envidraçados, conferindo um resultado estético de leveza e contemporaneidade, sem necessariamente divisar o espaço interno.

⁵ Life Cycle Assessment. **A análise do ciclo de vida** é a investigação e avaliação dos impactos ambientais de um determinado produto ou serviço, ou causados decorre da sua existência. Essa análise é feita sobre toda a vida do produto ou processo, desde o seu início (por exemplo, desde a extração das matérias-primas no caso de um produto) até o final da vida (quando o produto deixa de ter uso e é descartado como resíduo), passando por todas as etapas intermediárias (manufatura, transporte, uso).

⁶ A avaliação por análise do ciclo de vida inclui *inputs* ou entradas de cada etapa (demanda), e os correspondentes *outputs* ou saídas (impacto).

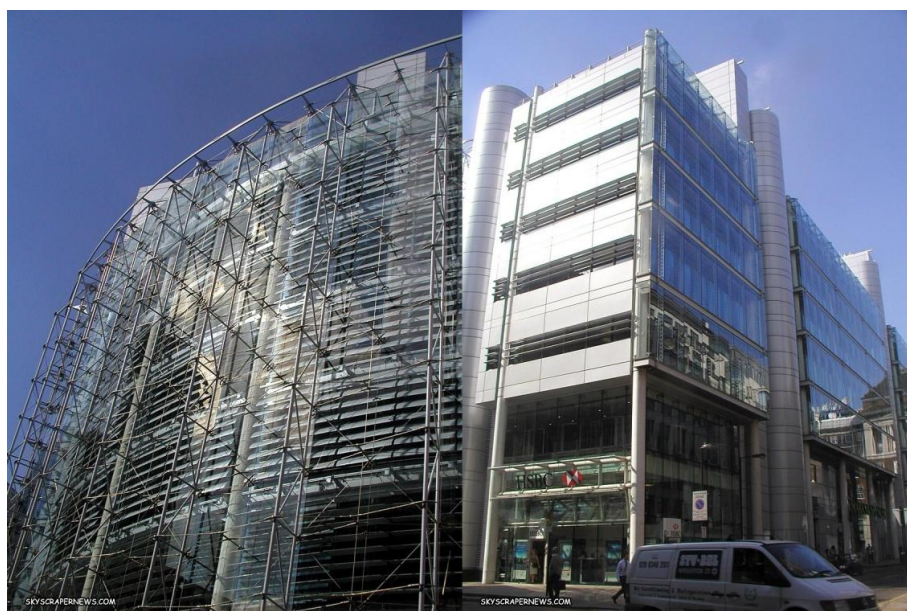


Figura 2.5. The Helicon London. FONTE: James Newman.

[Http://www.skyscrapernews.com/picturedisplay.php?ref=4676&idi=The+Helicon&self=nse&selfidi=4676+TheHelicon_pic2.jpg&no=2](http://www.skyscrapernews.com/picturedisplay.php?ref=4676&idi=The+Helicon&self=nse&selfidi=4676+TheHelicon_pic2.jpg&no=2)

Outro impacto estético do uso do sistema reside na profundidade da cavidade. As fachadas duplas, na visão do autor, parecem desafiar a gravidade, se opondo às pesadas soluções de fechamentos em alvenaria e janelas moduladas. O espaço criado pela cavidade, como no edifício Stadttor Dusseldorf (FIGURA 2.6), não apresenta peso visual, levando a sensação de transparência ao máximo, principalmente nas arestas dos pavimentos. Dependendo da geometria e das cores utilizadas, as superfícies dos fechamentos internos podem refletir a luz e criar o efeito de iluminar o edifício de dentro para fora.



**Figura 2.6. Das Dusseldorfer Stadttor . FONTE: MEYER-BOAKE,
http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/ds/twin.html**

O posicionamento dos dispositivos solares retráteis no interior da cavidade também pode contribuir para o resultado estético do edifício, conferindo maior variedade à fachada. Isto se opõe às soluções usuais brasileiras para edifícios de escritórios que utilizam de vidros reflexivos para seus fechamentos, resultando em planos uniformes e opacos. As FDV promovem uma tipologia de arquitetura com membranas diáfanas com diferentes graduações de permeabilidade visual

2.5 Fachadas duplas em foco: os prós e contras

Segundo o estudo conduzido Harrison e Meyer-Boake (2003), as fachadas duplas ventiladas são criticadas, ou defendidas, por duas correntes bem definidas. O campo favorável ao seu uso considera o sistema ambientalmente responsável, por reduzir o consumo de energia dos edifícios, e uma estratégia da arquitetura sustentável. Muitos estudos foram conduzidos por seus defensores, resultando em estatísticas que suportam seus posicionamentos e suas declarações. Os valores de redução de uso energético, obtidos em estudos de simulação, experimentos ou medições *in loco*, constituem os argumentos que justificam sua abordagem.

Já seus críticos, relatam os autores, se coloca ceticamente quanto à totalidade dos benefícios ambientais das fachadas duplas ventiladas, sendo um dos aspectos mais questionados o uso da tipologia de torres amplamente envidraçadas, vistas como contrárias a construções ecológicas e sustentáveis. Outra crítica diz respeito à complexidade de seu projeto e construção, dependente de orçamentos flexíveis e consultorias e profissionais especializados para atingir os parâmetros de desempenho pretendidos. Ou seja, sem o devido planejamento, a simples repetição de modelos baseados em torres envidraçadas envolve riscos no desempenho operacional.

Outros aspectos devem ser considerados ao avaliar os reais ganhos do uso do sistema, mesmo nos projetos bem sucedidos: o aumento da energia incorporada na construção, custos com manutenção, durabilidade e aumento da área construída não utilizável. Existem diferentes formas de resolver as fachadas dos edifícios, com maior uso de fechamentos opacos e isolantes, estratégias de sombreamento, uso de vidros seletivos que também resultam em economia energética, e a crítica constata que os estudos comparativos realizados pelos defensores do sistema comparam as fachadas duplas com envoltórios de baixo desempenho.

2.5.1 Considerações econômicas e sociais.

Muitos fatores devem ser considerados para a avaliação da validade da utilização das fachadas duplas ventiladas, incluindo aspectos financeiros, ecológicos e sociais de cada edifício particularmente (HARRISON e MEYER-BOAKE, 2003).

Os custos de construção da segunda pele da fachada dupla são consideravelmente maiores que os dos envelopes convencionais. Segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), na Europa, este custo chega a ser duas vezes maiores, enquanto nos Estados Unidos este valor aumenta para quatro vezes o valor de uma fachada simples. No entanto, outros aspectos devem ser analisados na questão econômica: a redução do custo de instalação dos sistemas de HVAC e dos gastos com energia, pela diminuição da demanda decorrente do desempenho energética aprimorada do sistema de dupla pele.

Ainda de acordo com os autores, estudos em projetos de arquitetura sustentáveis, como o desenvolvido por Ray Cole, *professor* da University of British Columbia, em 2001, *Sustainable Design of Buildings*, demonstram que, estatisticamente, os custos operacionais, em grande parte relacionada à demanda por resfriamento e aquecimento, são significativamente superiores aos gastos com a construção e implantação do edifício. Desta forma, considerando o potencial dos sistemas de fachadas duplas para reduzir a demanda energética operacional, os custos adicionais podem assim ser justificados. Como dito anteriormente, existem outras formas de solucionar o envoltório dos edifícios com este mesmo objetivo, mas sem as vantagens proporcionadas pelo maior aproveitamento da luz natural e melhoria dos padrões ambientais do espaço de trabalho. Assim, os custos sociais, como a satisfação dos ocupantes e boa produtividade, proporcionados pela atmosfera do ambiente de trabalho, agregam valor ao uso do sistema, desta forma também justificando o investimento maior.

Por outro lado, os custos com manutenção são maiores: a cavidade, os elementos de sombreamento e grelhas demandam limpeza constante para manter a integridade do funcionamento planejado do sistema. Os custos associados ao ciclo de vida do edifício também são significativos, já que as fachadas duplas ventiladas incorporam muitas vezes mecanismo de alta tecnologia que requerem constante manutenção e reparos, com alto valor para reposição.

2.6 Retrofitting: definição e exemplo de uso da estratégia

Quando se pensa em sustentabilidade, um grande potencial que se apresenta para o uso da FDV reside na possibilidade de readequação e reabilitação urbana de edifícios existentes e obsoletos, isto é, a estratégia de *retrofitting*. Neste contexto, os ganhos para o desempenho energético e ambiental das edificações podem ser mais palpáveis e significantes.

O uso do sistema de fachadas duplas é visto como uma importante estratégia de *retrofitting* (REY, 2004), desta forma os aspectos relacionados à readequação de edifícios existentes devem ser considerados com relevância. Edifícios de escritórios são sujeitos à obsolescência física e funcional. A duração do ciclo de *retrofitting* pode ser estimada entre 25 a 30 anos. A vida útil dos elementos construídos varia consideravelmente, de alguns meses para elementos internos a mais de 30 anos, para elementos de fachada. A manutenção adequada retarda, mas não evita a necessidade de intervenções maiores. A necessidade de intervenção na fachada é geralmente determinante para o desenvolvimento de um projeto desta natureza.

Os objetivos do *retrofit* de um edifício são o aumento no valor dos edifícios e a adaptação a novos padrões construtivos, de uso ou de conforto.

2.6.1 Considerações sobre a estratégia de *retrofitting* de edifícios

Segundo Cianciardi e Bruna (2004), o homem constrói para criar espaços onde determinadas necessidades possam ser satisfeitas, certas funções cumpridas e determinadas atividades domésticas, sociais, econômicas, realizadas ao abrigo das ações do meio ambiente. Com o passar dos anos, estas construções podem tornar-se obsoletas, por deterioração de sua estrutura construída; mudanças nos padrões de uso, de desempenho e de conforto; envelhecimento de suas instalações e sistemas ou mesmo alterações na percepção dos ocupantes quanto a seus aspectos estéticos. Ao não poder mais satisfazer seus requisitos de forma eficaz, estes edifícios podem ser subutilizados ou simplesmente abandonados, ficando a mercê da deterioração do tempo e do vandalismo inerente aos centros urbanos.

A estratégia de *retrofitting* de edifícios significa a recuperação, manutenção e restauração de edifícios, com o objetivo de possibilitar a readequação e a reinserção destes edifícios à estrutura da cidade, contribuindo para a maximização e otimização do espaço construído; assim como para a preservação dos valores arquitetônicos e paisagísticos das cidades. O *retrofitting* apresenta-se como uma ferramenta em prol da sustentabilidade do

ambiente construído, mas também contribui para o desenvolvimento socioeconômico da cidade. A revitalização do bairro do *Soho* em New York é um exemplo deste aspecto.

A renovação do edifício deve garantir a adequação às necessidades dos atuais ocupantes, pela reestruturação dos sistemas prediais e controle do gasto energético, segurança patrimonial e contra incêndios, conforto, acessibilidade, renovação dos materiais de revestimentos quando necessário. Segundo Rey (2004), o desejo pela renovação estética do edifício também deve ser considerada. A estratégia de retrofitting não se restringe a uma simples restauração do patrimônio histórico da cidade, ou de uma reforma, e sim a busca da eficiência do edifício e sua sincronicidade com o tempo presente. Isto se dá dentro das limitações físicas da antiga estrutura; com a vantagem da redução do prazo de construção e a adequação geográfica do imóvel dentro do contexto da cidade (CIANCIARDI E BRUNA, 2004).

Segundo Cianciardi e Bruna (2004), portanto, a recuperação, a manutenção e a restauração de edifícios são ferramentas de sustentabilidade ecológica do meio arquitetônico, por propiciar a maximização do ciclo de vida dos edifícios existentes, de forma a readequá-los às necessidades dos novos ocupantes e tornando-os funcionais para o tempo presente. Desta forma, “os edifícios são reinseridos à estrutura dinâmica da cidade de forma a contribuir para o retardamento do espraiamento horizontal desta, assim como para a vitalização de áreas degradadas dos grandes centros urbanos, para a preservação do patrimônio paisagístico e histórico citadino, além de contribuir para a redução do consumo de novos recursos naturais.” (CIANCIARDI E BRUNA, 2004).

2.6.2 As fachadas duplas ventiladas como estratégia de *retrofitting*

Rey (2004) identificou, em seu estudo, três tipos principais de estratégias de *retrofitting* de edifícios, focando o aspecto renovação de fachadas:

- Estratégia de estabilização: consiste em um conjunto de intervenções de melhoria que não alteram fundamentalmente nem a constituição ou a aparência do edifício.
- Estratégia de substituição: consiste na troca completa de certos elementos construídos e transforma simultaneamente a substância e aparência do edifício.
- Estratégia da fachada dupla ventilada: consiste na estabilização parcial da fachada existente e adição de uma nova camada (pele) de vidro. Envolve a completa alteração da aparência do edifício, mas mantém uma grande parte da substância do edifício.

Ao contrário das novas construções, os requisitos dos ocupantes atuais desempenham um papel importante para a definição do projeto de renovação. A possibilidade de manter atividades durante a operação pode ser decisiva na escolha final de uma estratégia. Para alguns tipos de edifícios, a estratégia de substituição pode representar uma desvantagem significativa, pela suspensão das atividades durante a obra.

Outros elementos, relacionados com a utilização do edifício, podem ter grande importância na escolha da estratégia mais adequada. Sistemas baseados em princípios de ventilação natural e resfriamento passivo exigem muitas vezes maior colaboração dos usuários e podem ser inaceitáveis em determinadas situações. A escolha de sistemas passivos é por de difícil execução, especialmente em edifícios que já estão projetados para uso de ar condicionado e em edifícios que são ocupados por várias empresas. Estratégias passivas são bem adaptadas para edifícios de escritórios que sejam, quanto á construção, relativamente simples e com moderados ganhos de calor interno. O princípio da renovação deve tentar a maior utilização de tecnologias com menor consumo de energia.

Ainda de acordo com Rey (2004), um projeto de *retrofitting* sempre gera um princípio de alteração, que deve ser selecionado não só no que diz respeito ao desempenho da estratégia prevista, mas também em relação ao grau de degradação, a qualidade arquitetônica e valor histórico da substância original. Nesse sentido, a estabilização e a estratégia de substituição levam os planejadores para uma decisão mais radical, tanto para a conservação ou para a substituição totais. De acordo com seu grau de desempenho (conforto, energia, custos, etc.), a estratégia de fachada dupla ventilada pode oferecer uma alternativa interessante, por aliar a conservação da substância original e a metamorfose da imagem do edifício.

Considerando a otimização global dos edifícios, os arquitetos e engenheiros devem, portanto, favorecer abordagens interdisciplinares e integradas. Nesse sentido, os estudos de caso realizados pelo estudo de Rey (2004) demonstraram que é possível melhorar vários aspectos do edifício de uma só vez. Em particular, não é contraditório o objetivo simultâneo de uma abordagem estética coerente, com redução no consumo de energia e melhora no conforto dos ocupantes.

2.6.3 Exemplo de *retrofitting* com uso de fachada dupla ventilada

A renovação do *Telus Building* (FIGURA 2.7), completada em 2001, é um exemplo da utilização da fachada dupla ventilada como estratégia de *retrofitting* (MEYER-BOAKE, 2003). O edifício, situado em Vancouver, Canadá, é originalmente conhecido como *William Farrell Building*. O edifício foi construído com oito pavimentos, fechamentos em alvenaria e estrutura de concreto. Esta foi completamente mantida pelo projeto de *retrofitting*, de autoria de Busby & Associates Architects, para a empresa canadense Telus. Esta fornece serviços de TV por cabo e satélite, internet e telefonia.



Figura 2.7. *Telus Building* - antes e depois da renovação. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003

As informações relatadas fazem parte do estudo de caso realizado por Meyer-Boake, 2003. Com o passar do tempo e mudança da tecnologia dos serviços de telefonia, parte do do espaço do edifício tornou-se subutilizada. Em vez de demolir a construção, o escritório Busby & Associates Architects propôs manter a estrutura original e renová-la. Com objetivo de conservação de energia, os arquitetos propuseram o uso do sistema de FDV. A segunda pele envidraçada, da tipologia de *twin-face*, contínua verticalmente ao longo da fachada, permite que os ambientes internos sejam ventilados naturalmente, por janelas praticáveis nos módulos originais do envoltório existente e no pano externo.

A profundidade da cavidade é de 90 centímetros. Esta estabelece também uma zona de transição, reduzindo o ruído do tráfego da rua. O envelope auxilia na manutenção das temperaturas internas nas faixas de conforto e reduz a necessidade por resfriamento e aquecimento dos ambientes. O fluxo do ar na cavidade é controlado por aletas móveis na base do espaço intermediário e por aberturas com abafadores sonoros no topo, auxiliado por ventiladores. Células fotovoltaicas são usadas para fornecer energia para os ventiladores da cavidade e aberturas automatizadas da pele externa.

O ar enclausurado pelo fechamento das aberturas no pano externo, nos dias frios, é aquecido pela incidência solar e utilizado para condicionar os ambientes, além de aumentar o isolamento quanto às perdas de calor através da fachada. No verão, com as esquadrias abertas, a convecção natural favorecida pelo efeito chaminé, com auxílio dos ventiladores, direciona o ar para o topo do edifício para exaustão, criando uma pressão negativa junto ao envelope interno que resulta em ventilação dos espaços. A figura 2.8 representa o funcionamento da fachada no período de inverno e verão.

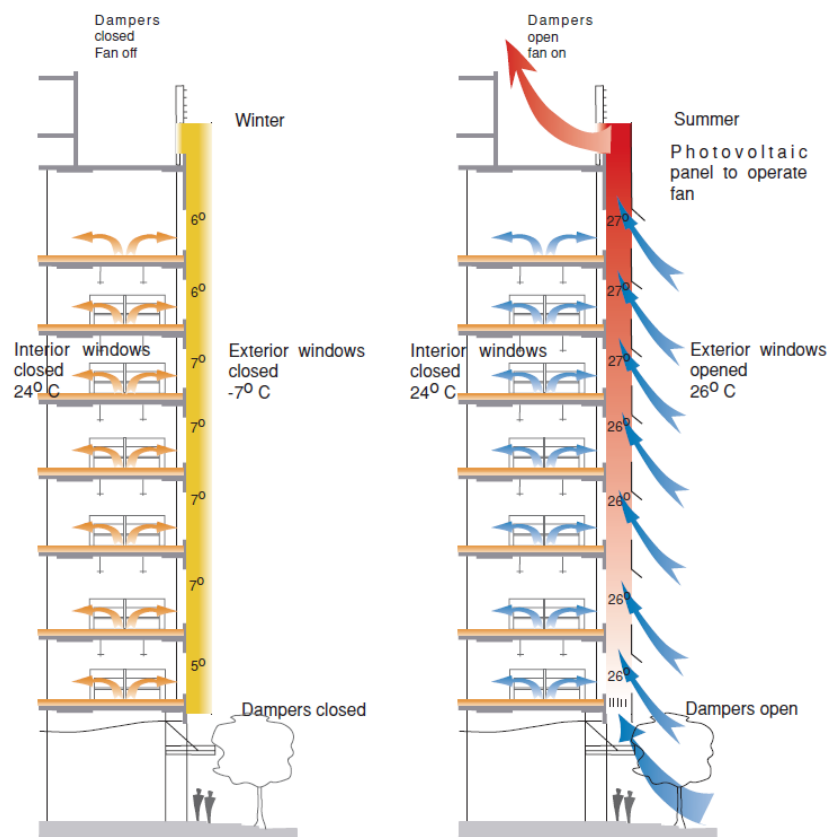


Figura 2.8. Funcionamento da FDV no inverno e verão. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003.

O interior do edifício foi completamente renovado. Os forros e dutos do sistema de HVAC foram removidos, a fim de melhorar a aparência do ambiente interno e o aproveitamento da luz natural, assim como expor o teto de concreto. Esta exposição

relaciona-se com as propriedades de massa térmica do material. Como visto anteriormente, os ganhos de calor gerados durante o dia são absorvidos pela mobília, paredes, pisos e tetos, e devolvidos para o ambiente proporcionalmente à capacidade térmica do material, sendo removidos pela ventilação. É uma estratégia passiva, com efetivos resultados para a redução das necessidades de condicionamento dos ambientes em dias quentes.

As janelas existentes foram restauradas para a condição de operabilidade. Na pele externa, foram previstas aberturas móveis, que são abertas em dias quentes para aumentar a ventilação da cavidade. O revestimento original de tijolo foi removido, expondo o concreto da estrutura original, com o intuito de promover o efeito de um dissipador de calor⁷. Para aumentar o aproveitamento da luz natural, e também diminuir a incidência de luz solar diretamente sobre os ocupantes, foram colocadas prateleiras de luz junto às janelas (FIGURA 2.9).

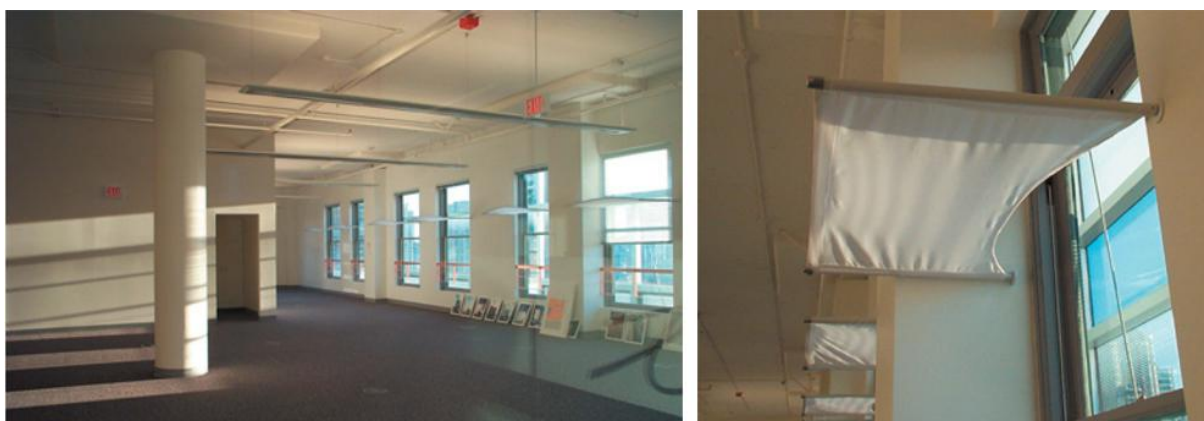


Figura 2.9. Vista do ambiente interno renovado e prateleiras de luz. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003

O envidraçamento da fachada alterna panos transparentes e opacos, estes últimos responsáveis pelo sombreamento do espaço intermediário. As figuras a seguir mostram alguns detalhes da fachada dupla e da cavidade.

⁷ Dissipador de calor é componente ou conjunto que transfere o calor gerado dentro de um material sólido em um meio líquido, como o ar ou um líquido.

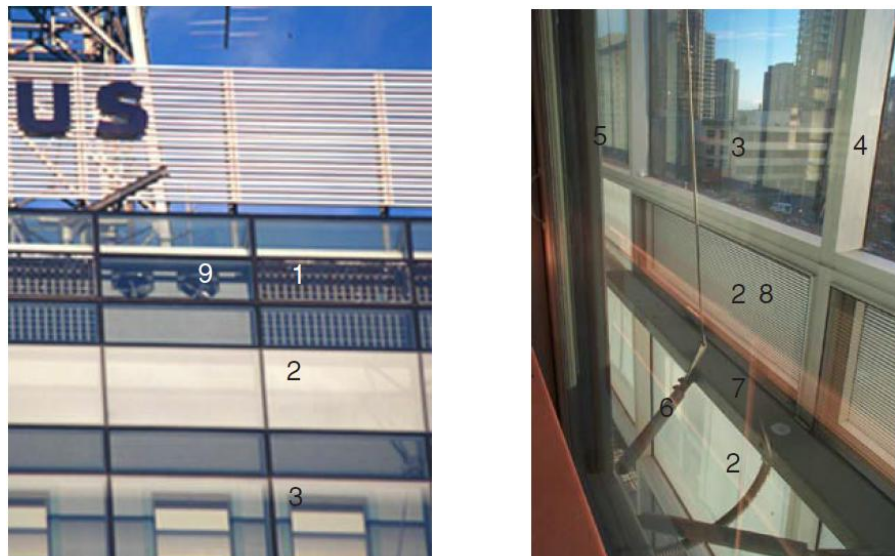


Figura 2.10. Vista externa e do interior da cavidade. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003

1. Painel com células fotovoltaicas. 2. Vidros opacos. 3. Vidros transparentes. 4. Estrutura da pele externa da fachada. 5. Parede de concreto exposta. 6. Suporte da pele externa. 7. Reforço da estrutura da pele externa. 8. Aberturas operáveis da pele externa. 9. Ventiladores de auxílio do fluxo do ar na cavidade.

O envelope renovado auxilia na modulação das temperaturas internas. Os ocupantes podem controlar as condições ambientais individualmente, pela abertura das janelas e também pelo controle da abertura dos difusores de ar sob cada bancada de trabalho.

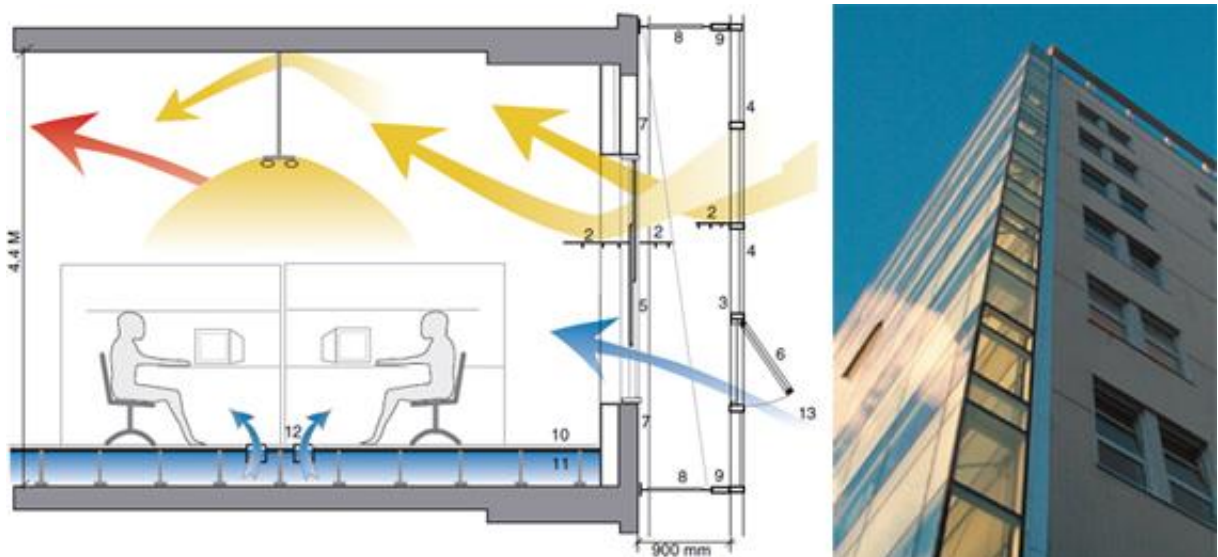


Figura 2.11. Corte do ambiente interno e detalhe da fachada. FONTE: MEYER-BOAKE, 2003

1. Espaço da cavidade: zona de transição climática sazonal. 2. Dispositivo de sombreamento e prateleira de luz. 3. Fachada cortina externa. 4. Painel de vidro serigrafado para controle solar. 5. Janelas existentes restauradas. 6. Aberturas automatizadas da pele externa. 7. Estrutura existente. 8. Suporte da fachada. 9. Reforço da fachada externa. 10. Piso elevado. 11. Pleno. 12. Difusores de ar. 13. Ventilação natural possível.

Os objetivos do *retrofitting* foram, em resumo: revitalização do uso do edifício, eficiência energética, com redução da demanda para resfriamento e aquecimento e aproveitamento da luz natural, e promoção de maiores condições de conforto ambiental para seus ocupantes.

2.7 Tipologias de fachadas duplas ventiladas

Como tendência nas últimas décadas, as fachadas duplas ventiladas passaram a ser utilizadas com muita frequência na Europa, Ásia e América do Norte, assumindo diferentes conceitos de funcionamento, configurações de construção e de ventilação da cavidade. Variadas classificações são encontradas na literatura científica, dependendo de qual aspecto construtivo é destacado. Segundo o BBRI (2004), deve-se distinguir entre as soluções apenas imaginadas e aquelas realizáveis na prática. Três critérios independentes para classificação das fachadas duplas são definidos pelo relatório, a saber:

- Tipo de ventilação.
- Compartimentação da fachada.
- Modo de ventilação da cavidade.

2.7.1 Critério de classificação: tipo de ventilação

O tipo de ventilação refere-se à origem das forças motrizes da ventilação da cavidade, considerando as fachadas duplas ventiladas, e se distinguem em três categorias (BBRI, 2004): natural, mecânica e híbrida.

A ventilação natural resulta de diferenças de pressão, e não depende de equipamentos mecânicos ou elétricos auxiliares. A ventilação mecânica depende do uso de equipamentos para a movimentação artificial do ar. A ventilação híbrida resulta da cooperação controlada entre o modo natural e a mecânica. Em geral, a ventilação natural é utilizada tanto quanto possível e a mecânica inicia apenas quando as condições de desempenho se tornam inadequadas dentro do desempenho desejado. Este sistema depende de mecanismos confiáveis de controle automatizados, e representa uma solução pouco usada.

As fachadas naturalmente ventiladas têm comportamento menos previsível que as mecânicas, no entanto, apresentam as vantagens das estratégias passivas.

As fachadas naturalmente ventiladas também são denominadas de fachadas passivas, enquanto as mecânicas podem ser chamadas de fachadas ativas. Os tipos híbridos de ventilação também podem ser identificados como fachadas interativas.

2.7.2 Critério de classificação: compartimentação da cavidade

A compartimentação da cavidade refere-se à divisão física do espaço intermediário da fachada. São apontados cinco tipos, a saber, *box-window façade* (fachada janela-caixa), *shaft-box façade* (fachada com shaft vertical), *corridor façade* (fachada corredor), *multi-storey façade* (fachada de múltiplos pavimentos) e *louver façade*, conforme a configuração da cavidade intermediária (FIGURA 2.12).

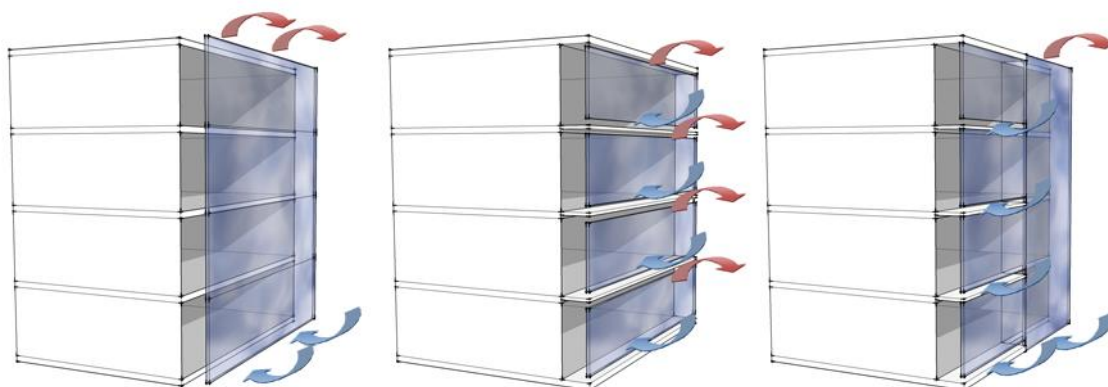


Figura 2.12. Classificação por compartimentação da cavidade.

Fachada de múltiplos pavimentos, fachada tipo corredor e fachada corredor com shaft vertical. A seta de cor azul indica a entrada do ar exterior fresco, e a seta vermelha a exaustão do ar aquecido na cavidade.

2.7.2.1 *Multi-storey façade* ou fachada de múltiplos pavimentos

A fachada de múltiplos pavimentos (*multi-storey façade*) é caracterizada pela cavidade única, sem divisões horizontais ou verticais (BBRI 2004), de forma que o espaço intermediário configura um grande volume. A ventilação da cavidade realiza-se geralmente através de aberturas próximas ao chão e sobre o telhado do edifício, mas há casos onde são colocadas aberturas intermediárias entre a base e o topo da fachada. Outra denominação desta tipologia encontrada na literatura é *building-high double-skin façade* (UUTU, 2001) – ou, traduzido livremente, fachada dupla ventilada da altura do edifício.

Nesta tipologia, para manutenção e limpeza do espaço intermediário, a cavidade deve ter profundidade suficiente, assim como grelhas intermediárias, para permitir o acesso e circulação de uma pessoa.

Segundo Uutu (2001), as vantagens associadas a essa tipologia são:

- Bom isolamento acústico contra ruídos do exterior.
- Proteção patrimonial pela adição da segunda pele.

De acordo com o relatório do BBRI (2004), nesta tipologia a cavidade é usualmente ventilada naturalmente, mas existem exemplos também com ventilação mecânica do espaço

intermediário. Como colocam os Harrison e Meyer-Boake (2003), a cavidade contínua explora as propriedades do efeito chaminé. Em dias quentes, o ar do espaço intermediário aquecido pela radiação solar, pode ser excluído por aberturas superiores na fachada externa, sendo substituído por ar fresco do exterior.

Uutu (2001) aponta algumas desvantagens potenciais desta tipologia. Segundo o autor, este tipo de fachada não se aplica para ventilação natural dos ambientes, dada pela abertura das janelas, pois o ar quente proveniente dos pavimentos inferiores do edifício tende a acumular-se nos pavimentos superiores, provocando superaquecimento do topo da cavidade. Além disso, o ar ascendente aquecido pode ser readmitido no edifício através das janelas abertas nos níveis superiores. Quanto ao desempenho acústico, haverá transmissão de ruídos entre ambientes e entre andares. Fogo e fumaça também podem se espalhar livremente pelo corredor de ar.

Motivações estéticas também levam à escolha deste tipo de fachada dupla, já que o fechamento exterior pode ser completamente envidraçado da base ao topo.

2.7.2.2 *Corridor façade* ou fachada corredor

A fachada corredor (*corridor façade*) denomina a tipologia onde a cavidade é dividida por pavimentos, por motivos de isolamento acústico, exigências de proteção contra incêndios ou necessidades específicas de ventilação (BBRI, 2004). Elementos físicos posicionados entre pavimentos segmentam a fachada em corredores independentes verticalmente, porém contínuos no sentido horizontal.

As vantagens associadas a essa tipologia, segundo Uutu (2001), são:

- Melhora do isolamento acústico entre pavimentos (verticalmente).
- Maior segurança e proteção contra propagação de incêndios e de fumaças ou odores indesejados.
- Ventilação natural dos ambientes internos é possível.

Segundo Harrison e Meyer-Boake (2003), a cavidade subdividida permite o insuflamento e exaustão do ar em cada pavimento, maximizando o potencial de uso da ventilação natural. Além disso, reduz o problema de superaquecimento dos andares superiores, transmissão de ruídos e de fumaça. A repetição da solução construtiva pode resultar em economia na construção.

2.7.2.3 *Box-window façade* ou fachada janela-caixa

A fachada janela-caixa (*box-window façade*) é também denominada de janela dupla ventilada (BBRI, 2004). Nesta configuração, elementos separadores horizontais, a cada pavimento, e verticais, a cada janela, segmentam a fachada em boxes independentes. As aberturas para entrada e saída do ar são instaladas em cada módulo, de forma que o aquecimento do ar da cavidade é menor e permite um nível mais eficaz de ventilação natural.

As vantagens associadas à essa tipologia, segundo Uutu (2001), são:

- Melhora do isolamento acústico entre pavimentos (verticalmente) e entre boxes (horizontalmente).
- Maior segurança e proteção contra propagação de incêndios e de fumaças ou odores indesejados.
- Ventilação natural dos ambientes internos é possibilitada com maior controle individual.



Figura 2.13. RWE Tower: vista da cavidade e módulos da fachada. FONTE: BBRI, 2004

Um exemplo do uso deste tipo de fachada dupla é o RWE Tower, em Essen, Alemanha, do escritório Ingenhoven Overdiek and Partners, de 1997 (FIGURA 2.13).

2.7.2.4 *Shaft-box façade* ou fachada com shaft vertical

A *shaft-box façade* resulta da combinação entre os conceitos da fachada contínua (*multi-storey façade*) e da fachada corredor (*corridor façade*). Os corredores de ar horizontais se conectam à cavidade contínua vertical, que configura um *shaft* para assegurar o efeito de exaustão do ar de cada pavimento (UUTU, 2001). O ar nos corredores é aquecido, e exaurido pelo shaft por efeito chaminé através das aberturas no topo deste espaço contínuo.

O objetivo deste conceito de compartimentação da fachada é intensificar o efeito chaminé na cavidade e assim propiciar maior uso da ventilação natural.

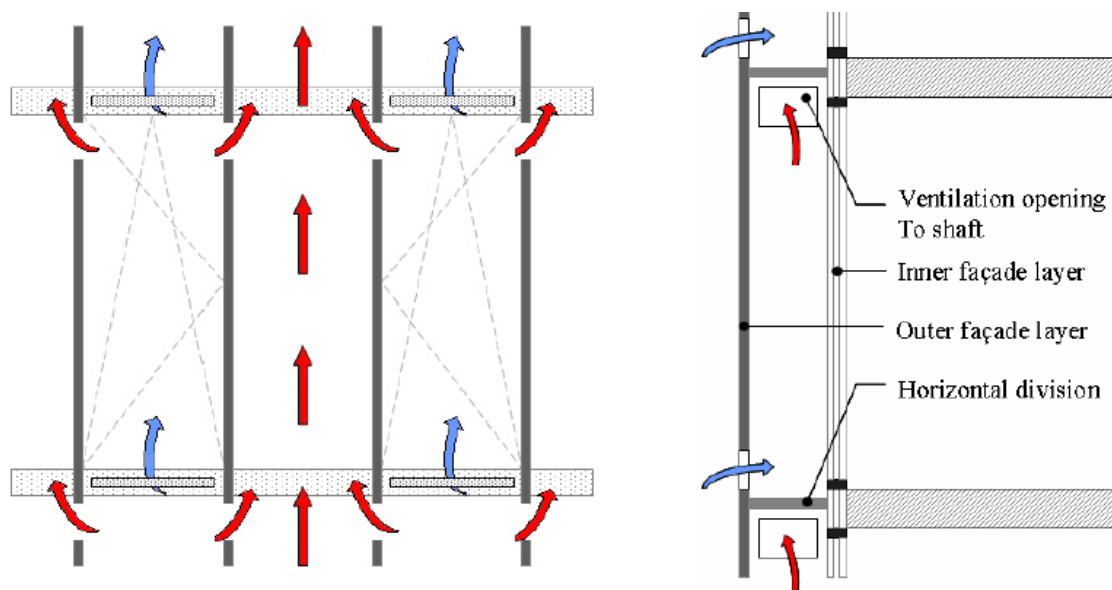


Figura 2.14. Funcionamento da *shaft-box facade*, elevação e corte. FONTE: BBRI, 2004.

As vantagens associadas a essa tipologia (FIGURA 2.14), segundo Uutu (2001), são:

- Melhora do isolamento acústico entre pavimentos (verticalmente).
- Ventilação natural dos ambientes internos é possível.

Mesmo sem o efeito do vento, a ventilação natural do edifício é garantida pela convecção no shaft. No entanto, a certa altura, a situação de pressão pode inverter e o ar aquecido pode retornar nas cavidades dos pavimentos.

2.7.2.5 *Multi-storey louver facade*

A *multi-storey louver facade* se assemelha à fachada de múltiplos pavimentos (*multi-storey*), com a diferença que a pele externa compõe-se de painéis pivotantes, que podem abrir, permitindo a entrada do ar externo, ou fechar-se, isolando o espaço intermediário. Esta tipologia aplica-se apenas às fachadas duplas ventiladas.

O edifício Aurora Place (FIGURA 2.15), em Sidney, projeto de Renzo Piano, é um exemplo desta tipologia. A construção é do ano 2000.



Figura 2.15. Aurora Place, Sydney, Austrália. FONTE: MARCONDES, 2004.

2.7.2.6 Avaliação das tipologias de fachada dupla ventilada

De acordo com o segundo critério de classificação (compartimentação), Poirazis (2004) apresenta uma comparação entre as diferentes tipologias de acordo com o isolamento acústico, proteção contra incêndio, ventilação natural e qualidade do ar.

A figura 2.16 apresenta um quadro, adaptado de Poirazis (2004), com a avaliação destes aspectos com relação aos tipos de fachada dupla ventilada.

	<i>Box window</i>	<i>Shaft box</i>	<i>Corridor façade</i>	<i>Multi-storey</i>
Isolamento acústico	Usada em situações com alto nível de ruídos externos ou com necessidade de isolamento entre ambientes adjacentes	O menor número de aberturas, com relação à <i>box-window</i> , promovem melhor isolamento dos ruídos externos	Problemas com transmissão de som entre ambientes adjacentes	Bom isolamento acústico com ruídos externos, mas com problemas com transmissão de som entre ambientes adjacentes
Proteção contra incêndios	Fator de risco baixo	Fator de risco baixo	Fator de risco médio	Fator de risco alto
Ventilação natural e qualidade do ar	Adequada para uso de ventilação natural dos ambientes por janelas operáveis	Necessita atenção devido ao agrupamento dos canais de exaustão do ar aquecido e poluído em um único <i>shaft</i> (perigo de inversão da direção do fluxo do ar)	Necessita atenção para que o ar aquecido e poluído não seja transmitido para ambientes adjacentes	Recomendado o uso de ventilação mecânica para os ambientes

Figura 2.16. Avaliação dos tipos de fachada conforme a compartimentação.

2.7.3 Critério de classificação: modo de ventilação da cavidade

Outra classificação se dá pelo modo de ventilação utilizado e capacidade de redução o consumo de energia do edifício. Esta é independente do tipo de ventilação aplicado (primeiro critério apresentado), e se refere à origem e destino do ar que circula na cavidade.

Na sequência, serão apresentadas duas formas de classificação neste critério, uma desenvolvida por Lang e Herzog (2000), a outra apresentada no relatório do BBRI (2004). As duas são muito semelhantes, sendo que a primeira apresenta três categorias e a segunda, cinco.

2.7.3.1 Classificação desenvolvida por Lang e Herzog (2000)

Lang e Herzog (2000) classificam as fachadas duplas em: *buffer system* ou zona de transição, *extract air system* ou sistema de extração de ar e *twin-face system* ou sistema de face dupla (FIGURA 2.17).

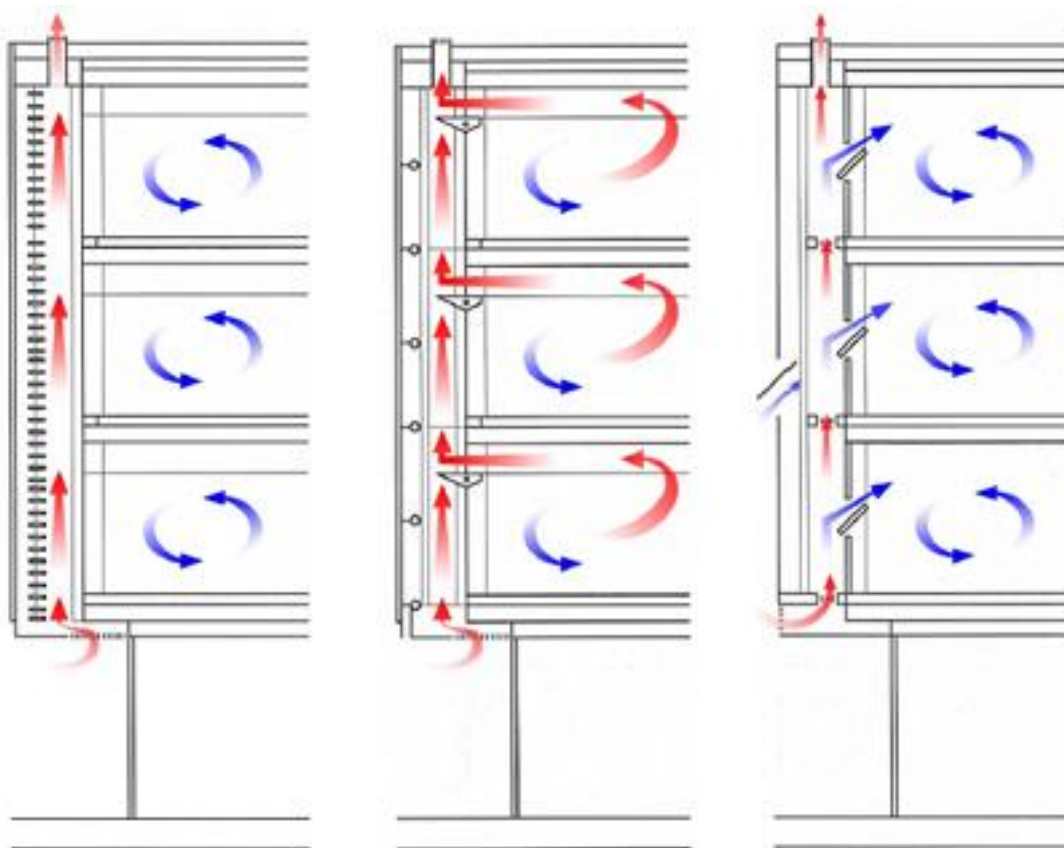


Figura 2.17. As tipologias de fachadas duplas ventiladas conforme o método de ventilação utilizado.

FONTE: HARRISON E MEYER-BOAKE, 2003.

Na ordem, da esquerda para a direita: Buffer system, Extract air system e Twin-face system.

O *buffer system*, segundo Lang e Herzog (2000), representa a tipologia mais antiga, usada há mais de cem anos, anteriores ao vidro insuflado ou duplo. Foram desenvolvidas com o objetivo de potencializar o uso de iluminação natural nos ambientes, garantindo ao mesmo tempo os níveis de isolamento térmico e acústico necessários. Os planos de vidro distanciam-se de 25 a 90 cm, sendo a pele interna estanque (sem janelas operáveis). O insuflamento de ar fresco para o interior do edifício se dá por equipamentos adicionais, por exemplo, um sistema de ar condicionado. Segundo Streicher (2005), uma variação possível deste sistema é selar a cavidade da fachada, sem comunicação com o ambiente externo ou interno, aumentando sua capacidade de isolamento. Um exemplo desta tipologia é o Occidental Chemical Building em Niagara Falls, New York (FIGURA 2.18).



Figura 2.18 - Occidental Chemical Building. FONTE: HARRISON e MEYER-BOAKE, 2003

O sistema de extração do ar consiste de um segundo plano de vidro, situado no interior da fachada dupla principal, denominado de unidades termo planas. Esta seção da fachada passa a fazer parte do sistema de HVAC do edifício: o ar usado e aquecido, entre os planos de vidro, é extraído mecanicamente através da cavidade, condicionando o vidro interno, enquanto a camada mais externa, de vidro isolante, reduz a transmissão de calor através da fachada. A ventilação natural dos ambientes não é possível, portanto tende a não reduzir o consumo de energia para condicionamento do ar, mas é recomendado para meios onde a poluição sonora é grande.

O sistema atualmente mais buscado pelos arquitetos é o *twin face system*, por permitir o uso da ventilação natural para os ambientes e assim contribuir para o desempenho ambiental do edifício e maior conforto dos ocupantes. Este se compõe de uma fachada interna

convencional, envolvida por uma pele simplesmente envidraçada. A diferenciação principal com os outros sistemas é a localização de janelas operáveis na pele interna, de forma a permitir ventilação natural ao controle dos usuários. São usadas também aberturas na fachada externa, para reduzir as temperaturas no interior da cavidade. O pano exterior tem por função também proteger os elementos de sombreamento das intempéries. Para melhorar o desempenho acústico, as aberturas internas e externas podem posicionar-se alternadamente.

A sistematização apresentada se aplica a fachadas constituídas principalmente de peles de vidro, mas outras configurações, com maior composição de fechamentos opacos e de elementos reticulados para controle solar e de ventilação, também podem ser consideradas como fachadas duplas, segundo Harrison e Meyer-Boake (2003). O sistema híbrido, como foi definido pela Society of Building Science Educators em 2001, combina aspectos variados dos sistemas citados anteriormente, e reúne os exemplos que não se adaptam às terminologias estabelecidas por Lang e Herzog (2000). Os elementos opacos ou reticulados podem ser utilizados tanto pelo envelope externo ou interno, como no Tjibaou Center, projeto de Renzo Piano construído em New Caledonia (FIGURA 2.19).

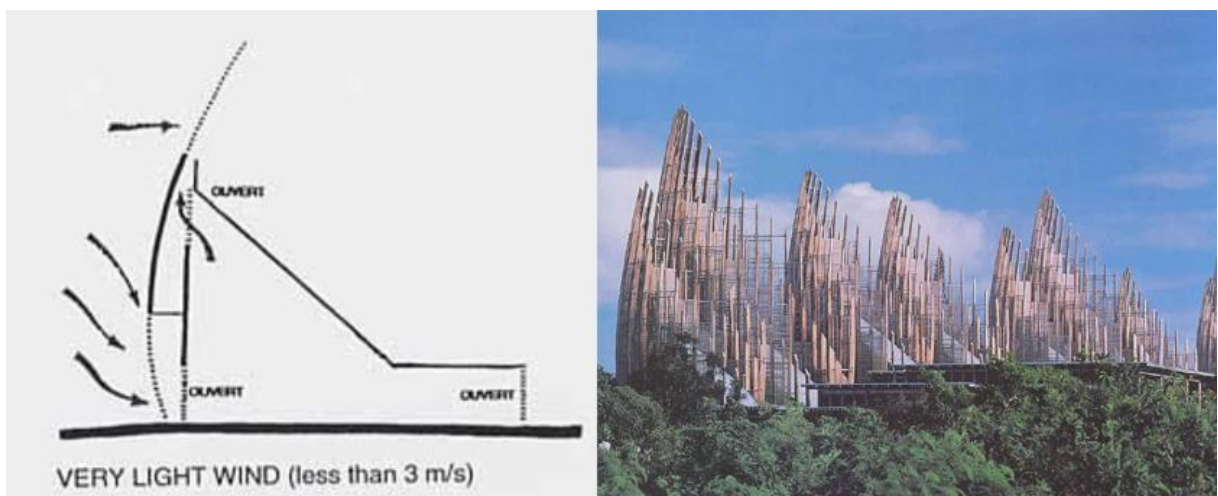


Figura 2.19. Tjibaou Cultural Centre, de 1998, projeto do arquiteto Renzo Piano. Croqui do arquiteto e foto do edifício. FONTE: YOSHIDA, 1998.

2.7.3.2 Classificação desenvolvida pelo BBRI (2004)

O relatório do BBRI (2004) apresenta cinco categorias principais do critério modo de ventilação da cavidade, com quatro variações secundárias associadas às principais. Estas são (FIGURA 2.20):

1. *Outdoor air curtain* ou cortina de ar exterior: o ar introduzido na cavidade vem do exterior e é imediatamente exaurido para fora do espaço. Desta forma, a ventilação da cavidade configura uma cortina de ar envolvendo a pele externa.
2. *Indoor air curtain* ou cortina de ar interno: o ar vem do interior do ambiente e retorna para o mesmo, através de um sistema de ventilação. A cortina de ar formada envolve a pele interna da fachada.
3. *Air supply* ou suprimento de ar: o ar exterior é insuflado para a cavidade, e desta para o ambiente ou sistema de ventilação, ou seja, o suprimento de ar do edifício origina-se da fachada.
4. *Air axhaust* ou exaustão do ar: o ar interno vem do interior do edifício e é expelido para o exterior.
5. *Buffer zone* ou zona de transição: as duas peles da fachada são estanques, não permitindo a ventilação da cavidade, conformando uma zona isolante de transição entre exterior e interior do edifício.

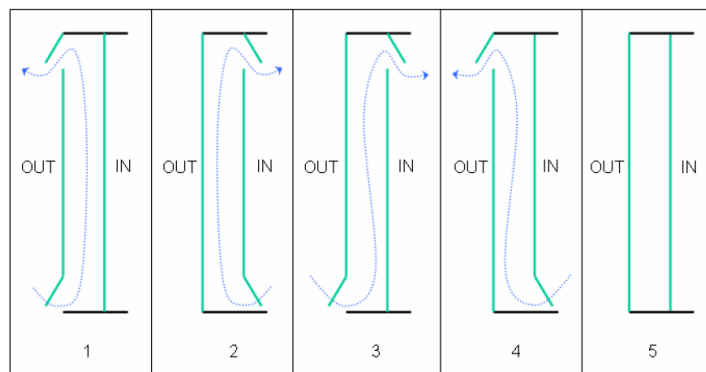


Figura 2.20. Os cinco tipos de ventilação da cavidade conforme o BBRI. FONTE: BBRI, 2004

Outra categoria, semelhante à *twin face* da classificação de Lang e Herzog (2000), refere-se às fachadas com aberturas inferiores e superiores em ambos os fechamentos da cavidade (FIGURA 2.21).

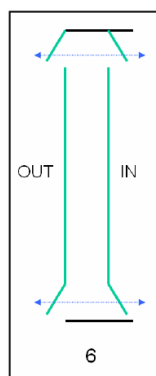


Figura 2.21. Tipo especial de modo de ventilação. FONTE: BBRI, 2004.

2.7.3.3 Coexistência de diferentes modos de ventilação na mesma fachada

Diferentes modos de ventilação podem coexistir na mesma fachada dupla, principalmente quando se trata de fachadas duplas ventiladas. A definição precisa do modo de ventilação da cavidade depende de muitos fatores, como condições climáticas (velocidade de ventos, diferenças de temperatura, etc.) e sistema de ventilação mecânica do edifício, entre outros. As fachadas com ventilação mecânica não têm aberturas e caracterizam-se por apenas um modo de ventilação.

2.7.3.4 Combinação dos três critérios de classificação

Segundo o relatório do BBRI (2004), a combinação dos critérios das categorias de classificação dará origem ao conceito da fachada dupla do edifício, sendo que algumas combinações são mais usuais. Alguns conceitos serão mais adequados a um tipo específico de clima do que outros. A figura 2.22 sistematiza as relações possíveis entre as categorias.

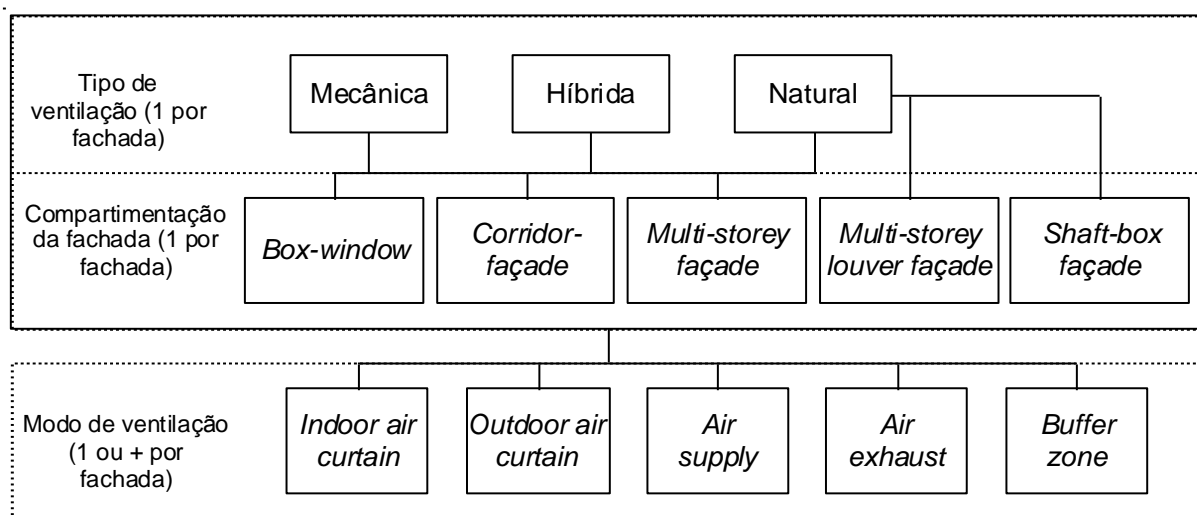


Figura 2.22. Conceitos de fachadas duplas pela combinação dos três critérios de classificação. FONTE: adaptado de BBRI, 2004

Outras classificações e critérios são encontrados na literatura, por exemplo nos trabalhos de Arons (2000) e Saelens (2002), mas não serão citados neste estudo. Considerou-se que a sistematização apresentada é mais abrangente e significativa para esta pesquisa.

2.8 O comportamento da fachada dupla ventilada e as propriedades físicas da cavidade

O comportamento da fachada dupla é complexo, por constituir um sistema onde três processos físicos principais interagem e influenciam as condições de conforto e de temperaturas obtidas no interior do edifício: fluxo do ar, transferência de calor e transmissão solar⁸. Estes processos resultarão em diferentes desempenhos conforme a composição dos parâmetros construtivos da cavidade, tipo de vidro utilizado, a condição climática externa (estação do ano e comportamento dos ventos), tipo de ventilação, orientação do edifício, entre outros, que serão analisados com maior detalhe na sequência.

O texto a seguir, sobre as propriedades físicas da cavidade, será subdividido nos seguintes assuntos:

- Fluxo do ar na cavidade.
- Transferência de calor.
- Posicionamento dos recursos de sombreamento.
- Influência do tipo de vidro no desempenho térmico das FDV.

2.8.1 Fluxo do ar na cavidade e ventilação

O desempenho térmico das fachadas duplas (o microclima da fachada) é afetado significativamente pelos fluxos do ar na cavidade (MANZ, *et al.*, 2005). O comportamento do fluxo do ar no espaço intermediário, por sua vez, é influenciado por vários fatores: pelo calor transmitido e emitido pelas superfícies transparentes e opacas, pela geometria do edifício e da cavidade, pela resistência ao movimento do ar dos elementos como grelhas e grades, pela presença de ventiladores e pelas condições climáticas do entorno. Estes irão determinar o padrão e as taxas do fluxo do ar, os fluxos de calor e distribuição de temperaturas na cavidade.

Como apresentado anteriormente, as fachadas duplas podem ter a ventilação da cavidade de forma natural ou mecânica, e as características do fluxo do ar apresentadas a seguir respeitam essa subdivisão.

⁸ A transmissão solar é transmissão de energia solar direta para o interior do edifício.

2.8.1.1 Fachadas duplas ventiladas naturalmente

As fachadas duplas ventiladas naturalmente possibilitam o uso de ventilação natural para os ambientes dos edifícios (BBRI, 2004). Este fato promove um ambiente com atmosfera mais agradável para os ocupantes, assim como reduz a necessidade de sistemas mecânicos de condicionamento (LI, 2001). Por outro lado, se a fachada não for corretamente projetada, problemas podem ocorrer como a formação de pressões que dificultem a abertura das janelas do plano interior ou exaustão ineficiente do ar aquecido do espaço intersticial.

A figura 2.23 apresenta, na classificação do BBRI (2004), as possibilidades tipológicas desta fachada.

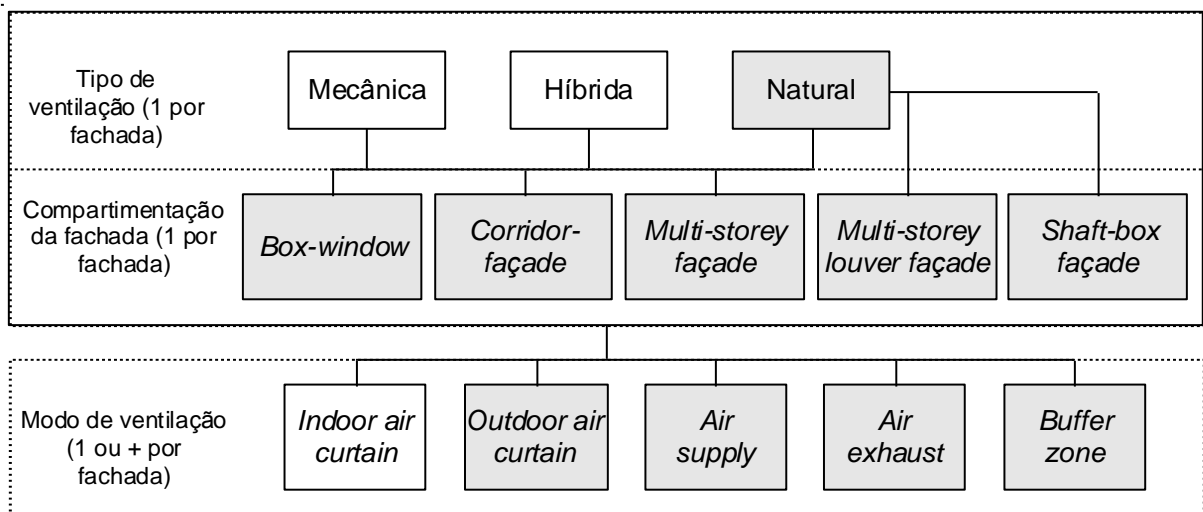


Figura 2.23. Características das fachadas duplas ventiladas naturalmente. FONTE: adaptado de BBRI-2004.

Ainda de acordo com Li (2001), para cavidades naturalmente ventiladas, o ar é movimentado no espaço intermediário de duas maneiras, pela pressão do vento e/ou por efeito chaminé. A pressão do vento geralmente domina o fluxo do ar. A ação do vento cria zonas de pressão diferentes entre o exterior e o interior, assim promovendo o movimento do ar. No caso de ausência de vento, o efeito dominante passa a ser o efeito chaminé, onde o ar aquecido no espaço intermediário torna-se menos denso e tende a sair da cavidade pelas aberturas superiores, sendo substituído pelo ar mais fresco do exterior, removendo o calor pelo fluxo do ar. O trabalho cooperativo dos dois efeitos pode ser conseguido pelo correto dimensionamento dos componentes do sistema. A configuração deve ser de forma a permitir a adição das duas forças, de outra forma, o ar aquecido na cavidade será irradiado para o interior, e a abertura do pano interno irá insuflar ar aquecido para o espaço ocupado.

Ututu (2001) reforça esta questão. Segundo o autor, quando a radiação solar é alta, a cavidade intermediária deve ser bem ventilada para prevenir o superaquecimento dos ambientes, efeito contrário ao que pode se estar buscando. Neste caso, os critérios mais importantes para assegurar o funcionamento do sistema são a profundidade da cavidade intermediária e o dimensionamento das aberturas de ventilação na camada externa. Isto ocorre porque a troca do ar entre o meio ambiente e a cavidade depende da ação do vento sobre a fachada externa, do efeito chaminé (FIGURA 2-24) e do coeficiente de descarga das aberturas, que podem ser permanentemente abertas, controláveis manualmente ou mecanicamente.

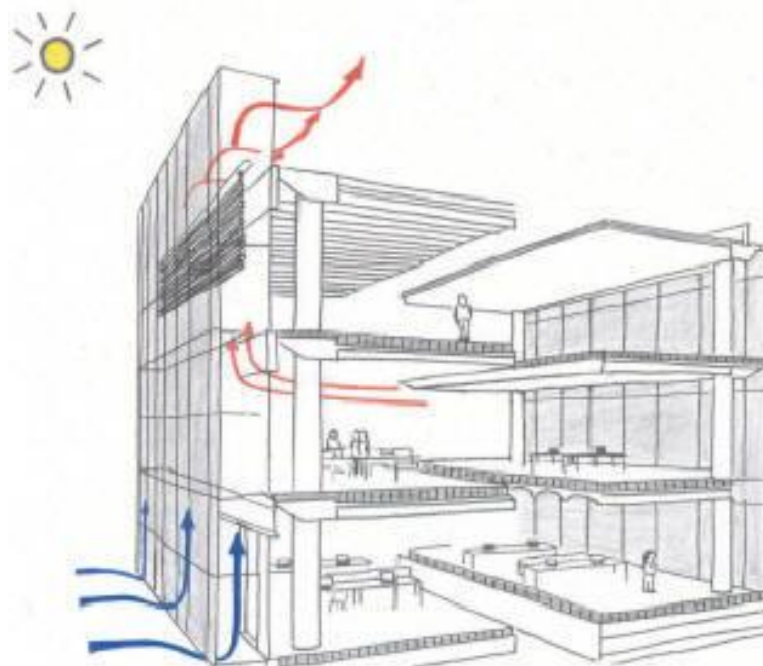


Figura 2.24 - Efeito chaminé na FDV. O ar aquecido no espaço intermediário torna-se menos denso e tende a sair da cavidade pelas aberturas superiores, sendo substituído pelo ar mais fresco do exterior, removendo o calor pelo fluxo do ar. FONTE: POIRAZIS.

[Http://www2.ebd.lth.se/ebdhome/avd_ebd/main/personal/Project_home_page/main/Energy%20and%20ind.clim.%20simul%20ofSingleSkinFacades.htm](http://www2.ebd.lth.se/ebdhome/avd_ebd/main/personal/Project_home_page/main/Energy%20and%20ind.clim.%20simul%20ofSingleSkinFacades.htm)

Portanto, segundo Lee *et al.* (2002), a efetividade do fluxo do ar na cavidade é determinada pela temperatura de entrada do ar externo, altura entre as aberturas de insuflamento e exaustão da pele externa, dimensionamento destas aberturas, grau de resistência criado pelo ângulo de inclinação da grelha de insuflamento, temperatura das peles e turbulência do fluxo de ar entre as aberturas caso não haja vento. Stec and van Passen (2003) acrescentam os seguintes fatores à relação anterior:

- A profundidade da cavidade e posição dos elementos de sombreamento internos.
- O material do elemento de sombreamento, especialmente quanto ao coeficiente de absorção e de reflexão do mesmo.
- A qualidade do material das peles internas e externas, especialmente quanto ao fator de transmissão solar, mas também quanto ao coeficiente de absorção, reflexão e transmitância térmica.

Gratia e De Herde (2004-b) analisaram com maior profundidade o funcionamento da ventilação natural na cavidade. Considerando que normalmente a altura das aberturas de admissão é menor que a profundidade do espaço intermediário, o ar entra na cavidade com maior velocidade, perdendo em seguida parte da pressão. No entanto, apenas em cavidades relativamente estreitas, com profundidade menor que 40 centímetros, perdas de pressão significativas ocorrerão ao longo da fachada. De outra forma, o espaço intermediário não oferecerá maior resistência ao fluxo do ar. Quando o elemento de proteção solar está abaixado, o canal do ar poderá ficar subdividido em dois. Neste caso, o ar mais próximo ao fechamento externo será aquecido pela incidência solar e, com menor densidade, subirá mais rapidamente para a abertura de exaustão. A porção de ar próxima ao fechamento interno será extraída mais lentamente, por estar mais frio.

Assim como Uutu (2001), os autores reforçam a necessidade da adequada ventilação da cavidade para prevenir o superaquecimento do ar no seu interior, o que provocaria transmissão de calor indesejado por radiação para os ambientes internos. Como conclusões do estudo, colocam que a direção do fluxo do ar e as taxas de troca de ar nos ambientes dependem do efeito chaminé e da pressão do vento no edifício. Em dias ensolarados, a ação do efeito chaminé na cavidade é dominante. No entanto, o fluxo do ar não é constante, já que o efeito chaminé e do vento podem se opor, em vez de cooperar.

2.8.1.2 Comportamento da FDV na condição de calor e de frio

As fachadas duplas ventiladas possuem características dinâmicas, segundo Arons (2000), devido ao movimento do ar na cavidade e ao movimento dos componentes de sombreamento. O desempenho do sistema apresenta uma flutuação sazonal. Em dias quentes, o ar é introduzido na cavidade para transportar o calor que de outra forma ficaria acumulado e seria parcialmente transferido para o espaço interno adjacente (FIGURA 2.25). A temperatura da membrana interna se mantém mais baixa pela ação do fluxo de ar. Isto reduz a condução, convecção e radiação do pano interior para o espaço ocupável. O resultado é que menos calor

é transferido do exterior para o interior, e menos energia é requerida para condicionamento. Os ocupantes sentem-se mais confortáveis porque a temperatura radiante dos fechamentos é reduzida.

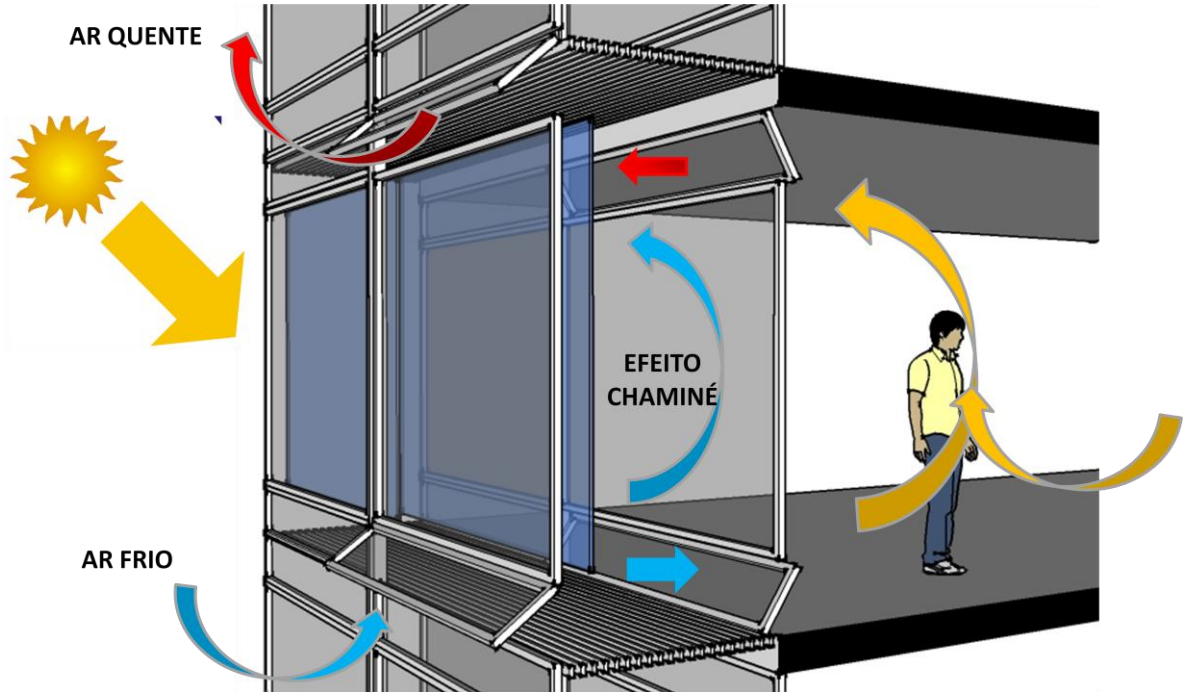


Figura 2.25 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de calor, com as esquadrias abertas.

A radiação solar aquece o ar da cavidade, tornando o ar no espaço intersticial menos denso. Este ar aquecido tende a subir e ser extraído pela abertura superior da cavidade (efeito chaminé). Com isso, ar mais fresco do exterior é insuflado pela abertura inferior da cavidade. Esta movimentação do ar na cavidade induz a ventilação do ambiente por extração do ar interno, efeito mais efetivo se houver possibilidade de ventilação cruzada no interior do edifício. Se a velocidade do vento for superior ao efeito chaminé, a direção da ventilação pode ser invertida, e ambas as aberturas do fechamento externo insuflam o ar externo para a cavidade. A proteção solar no interior da cavidade abaixada reduz a transmissão solar direta para o ambiente.

O aquecimento do ar na cavidade pela ação do sol aumenta a ação do efeito chaminé (*stack effect*), de forma que ar fresco é insuflado mais rapidamente quanto mais a temperatura intersticial aumenta. Paradoxalmente, o aquecimento pela ação da radiação solar contribui para o resfriamento da fachada. Este efeito pode ser denominado de mecanismo autorregulador natural da cavidade (BBRI, 2004).

Em dias frios, dois cenários gerais se apresentam (ARONS, 2000). No primeiro, considerando o sistema fechado, sem ventilação com o exterior, a cavidade é aquecida pela radiação solar, aumentando a temperatura do pano interno e assim reduzindo as perdas de calor interno por convecção, condução e radiação (FIGURA 2.26). Este efeito é apresentado com maior detalhe no item do texto sobre transferência de calor.

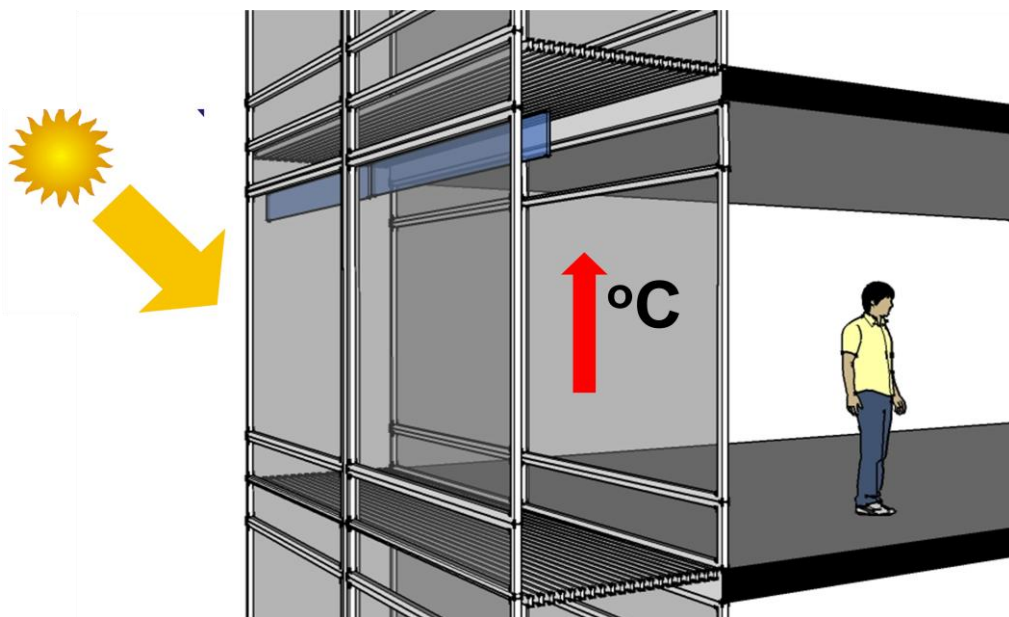


Figura 2.26 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de frio, com as esquadrias fechadas.
 Nos períodos de frio, todas as aberturas são fechadas, aumentando o isolamento da fachada. A temperatura da cavidade aumenta. A temperatura do fechamento interno mantém-se mais confortável, pois em contato com o ar mais aquecido da cavidade perde menos calor. A proteção solar é recolhida, de forma que é possível aproveitar da transmissão solar direta.

No segundo cenário, ar aquecido na cavidade pode ser aproveitado para o ambiente interno do edifício (FIGURA 2.27).

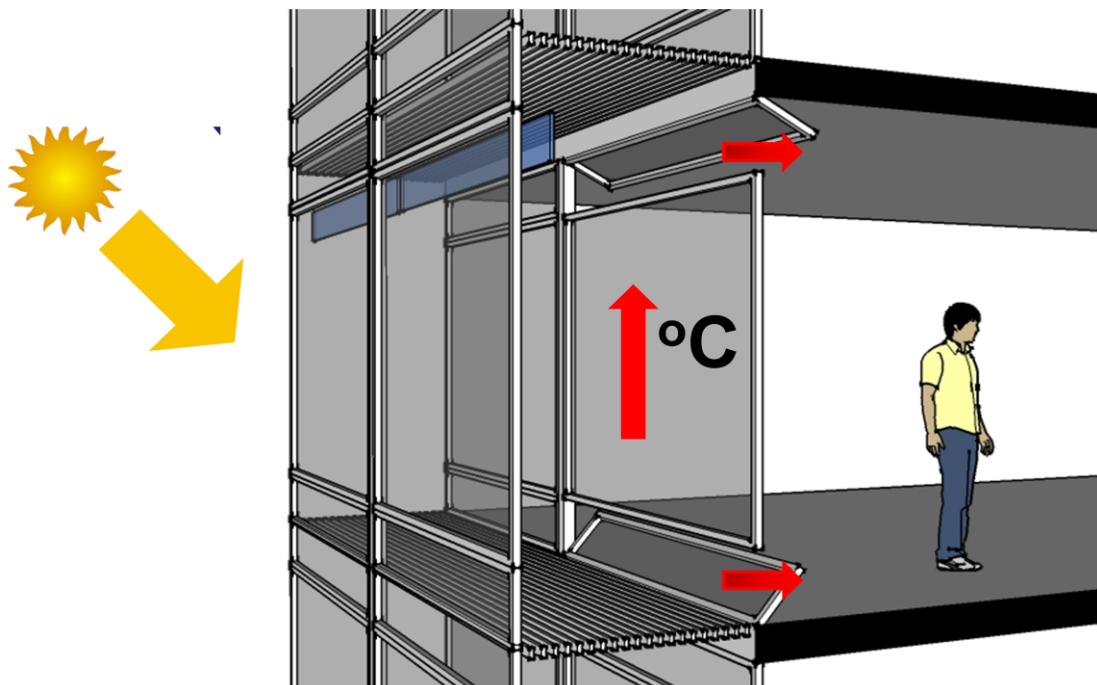


Figura 2.27 - Funcionamento da ventilação natural na FDV em dias de frio, com as esquadrias do fechamento interno abertas.

Nos períodos de frio, as aberturas do fechamento externo são fechadas e as internas abertas. A temperatura da cavidade aumenta. Se em temperatura confortável, o ar aquecido na cavidade pode ser admitido no interior do ambiente para torná-lo mais confortável. A proteção solar é recolhida, de forma que é possível aproveitar da transmissão solar direta.

Segundo o BBRI (2004), as fachadas duplas ventiladas naturalmente se apresentam em duas categorias: fachadas onde a ventilação da cavidade não é controlada, e fachadas onde a ventilação é controlada por aberturas, grelhas, boxes entre outros. Neste último caso, a ativação do sistema de controle mudará de um modo de ventilação para outro.

Por exemplo, no caso da fachada tipo corredor com controle, os modos de ventilação possíveis são:

- *Outdoor air curtain* (cortina de ar exterior), quando o sistema de ventilação com o exterior está aberto e as aberturas da pele interna estão fechadas.

- *Air supply* (suprimento de ar) e *exausth* (exaustão do ar), quando os sistemas de ventilação com o exterior e as aberturas da pele interna estão abertos.

- *Buffer zone* (zona de transição): quando os sistemas de ventilação com o exterior e as aberturas da pele interna estão fechados.

Este controle possibilita a adaptação da fachada à condição climática externa, promovendo o maior isolamento do sistema (no caso de dias mais frios) ou maior resfriamento (para dias de maior calor).

2.8.1.3 Otimização do fluxo do ar por convecção em cavidades naturalmente ventiladas

Gan (2006) desenvolveu um estudo sobre o fluxo do ar por efeito chaminé em cavidades naturalmente ventiladas, incluindo *solar chimney* e fachadas duplas, pelo método de simulação. A possibilidade de ventilação natural dos ambientes pela fachada dupla também foi investigada.

O modelo de FDV utilizada no estudo é do tipo *multi-storey*, compreendendo quatro pavimentos e doze metros de altura no total. Passarelas intermediárias e recursos de sombreamento foram desconsiderados, de forma a simplificar o modelo. A largura da cavidade é muito superior à sua profundidade, de forma que o fluxo do ar pode ser considerado bidimensional. As simulações foram realizadas para profundidades da cavidade de 0,4 a 1,0 metros em três configurações tipológicas: uma com abertura única para entrada do ar na base da fachada, e duas com quatro aberturas para ventilação dos ambientes ao longo da pele interna, uma com 0,2 metros de altura e a outra com variação desta dimensão conforme a profundidade da cavidade. A integração com células fotovoltaicas também foi investigada. O ganho de calor das peles interna e externa foram estimados a partir de balanço térmico.

O fluxo do ar apresentou um padrão próximo ao regular nas simulações com abertura única para entrada do ar, enquanto os outros modelos resultaram em padrões assimétricos. Com as aberturas de ventilação na pele interna, o fluxo do ar, além de assimétrico, mostrou-se não uniforme, devido à turbulência causada pela interferência do ar ascendente na cavidade com o ar oriundo dos ambientes. A velocidade média do ar na cavidade diminuiu com o aumento da profundidade.

Os resultados da previsão da velocidade do ar na abertura de saída são descritos na figura 2.28.

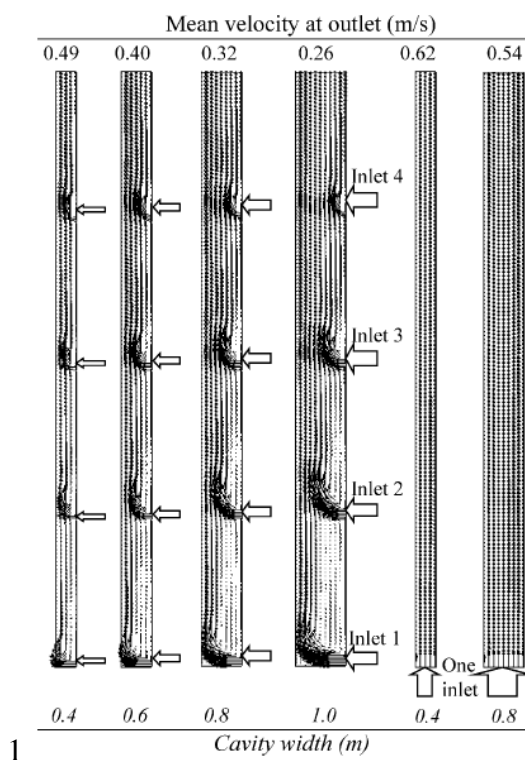


Figura 2.28. Valores previstos de velocidade do fluxo do ar na cavidade. FONTE: GAN, 2006

O estudo demonstra a possibilidade do uso da fachada dupla ventilada não somente para diminuição da demanda por condicionamento artificial do ar, mas também para ventilação natural dos ambientes. No entanto, as taxas obtidas de ventilação variaram a cada pavimento, pois os andares mais altos apresentaram valores menores de convecção natural que os mais baixos. Para a ventilação natural do edifício, o estudo concluiu que a profundidade ideal da cavidade está entre 0,6 e 0,8 metros.

Torres *et al.* (2007) realizaram um estudo sobre o comportamento de fachadas duplas ventiladas no clima mediterrâneo, investigando através de simulações a influência da profundidade da cavidade e dimensões das aberturas para ventilação do espaço intermediário,

comparando as tipologias *multi-storey* e *corridor facade*. Os valores de profundidade da cavidade variaram de 0,4 a 1,0 metros, e a área estudada de aberturas da pele externa variou entre 5, 10 e 15%.

Neste estudo, verificaram que a demanda por condicionamento artificial dos ambientes reduziu na fachada do tipo *multi-storey* com menor profundidade da cavidade, pelo efeito do aumento da temperatura do ar no espaço intermediário e correspondente aumento da velocidade do fluxo do ar pelo efeito chaminé. Gan também concluiu este fato em sua pesquisa (FIGURA 2.28). Mas o aspecto mais interessante deste estudo está na correlação realizada entre a profundidade da cavidade e as aberturas de ventilação da mesma. Os autores verificaram que a área de abertura da pele externa de 15% reduziu a demanda por energia de condicionamento.

2.8.1.4 Ventilação natural do edifício e a fachada dupla ventilada

Gratia e De Herde desenvolveram uma série de estudos sobre a implementação da estratégia de ventilação natural diurna dos ambientes em edifícios com fachada dupla ventilada do tipo *multi-storey* ou fachada de múltiplos pavimentos (2004-a, 2004-b, 2004-c e 2007-a), nas condições climáticas da Bélgica.

No artigo sobre diretrizes para uso eficiente da ventilação natural diurna para edifícios com fachada dupla, os autores investigaram, através de simulação computacional, o uso da estratégia em um dia de verão.

Para os autores, o uso de ventilação natural como estratégia de resfriamento dos ambientes só se torna possível com a existência de aberturas para ventilação cruzada entre fachadas opostas. Com os ganhos de calor solar na cavidade, o ar aquecido tende a ascender e ser extraído, induzindo a entrada do ar mais frio da fachada menos ensolarada através dos ambientes. Para o estudo, considerou-se a existência de aberturas entre os escritórios, de forma a possibilitar a movimentação do ar (FIGURA 2.29). A ventilação cruzada necessita de aberturas entre 15 e 20 vezes menores que a unilateral, para obtenção do mesmo efeito de resfriamento.

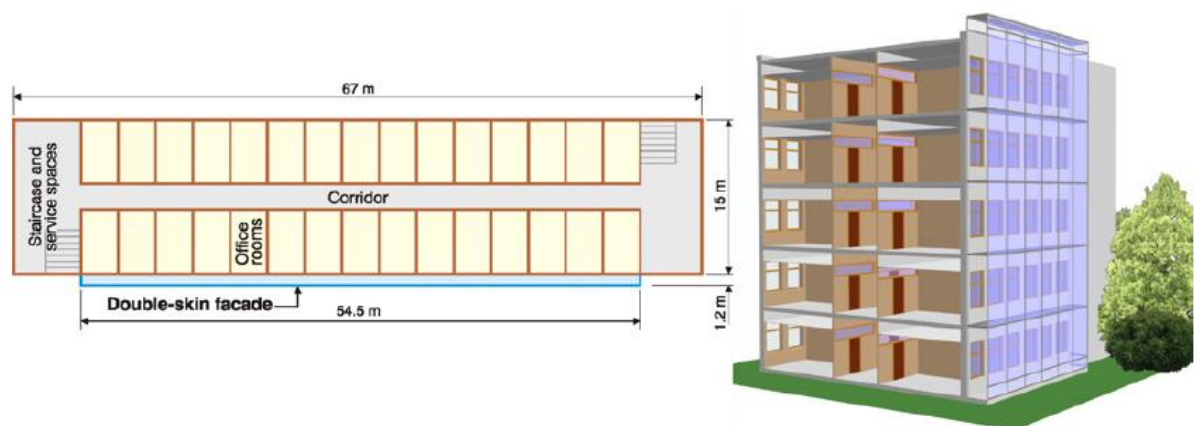


Figura 2.29. Representação do edifício estudado, com adição de fachada dupla na face orientada para sul.
FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2007-a

Como observado anteriormente, a efetividade da ventilação do edifício com fachada dupla depende da orientação solar, da velocidade e direção do vento e do efeito chaminé na cavidade. Os resultados do estudo e as diretrizes recomendadas pelos autores serão apresentados na sequência.

Se a fachada dupla está ensolarada, a temperatura da mesma sobe rapidamente durante o dia. Nas simulações, assumiu-se que os dispositivos de sombreamento estão em uso.

Em condições favoráveis de vento, uma taxa significativa de ventilação natural cruzada pode ser obtida com uma abertura de apenas 4% das janelas superiores ($0,048 \text{ dm}^2/\text{escritório}$). Se a fachada dupla está a sotavento (contra o vento), o efeito do vento é dominante (FIGURA 2.30), induzindo a ventilação da cavidade ao criar uma zona de menor pressão junto à abertura superior. O efeito chaminé poderá reforçar o fluxo do ar na cavidade, desde que a abertura superior para saída do ar do espaço intermediário esteja aberta e a entrada do ar esteja fechada. Neste caso a temperatura da fachada continua a ser bastante elevada, por ser ventilada apenas pelo fluxo oriundo dos escritórios. O efeito chaminé diminui com a altura, portanto as janelas nos pisos superiores devem ser maiores. A abertura da entrada do ar na base da cavidade promove o decréscimo da temperatura intersticial em aproximadamente 10° C , e também a circulação do ar.

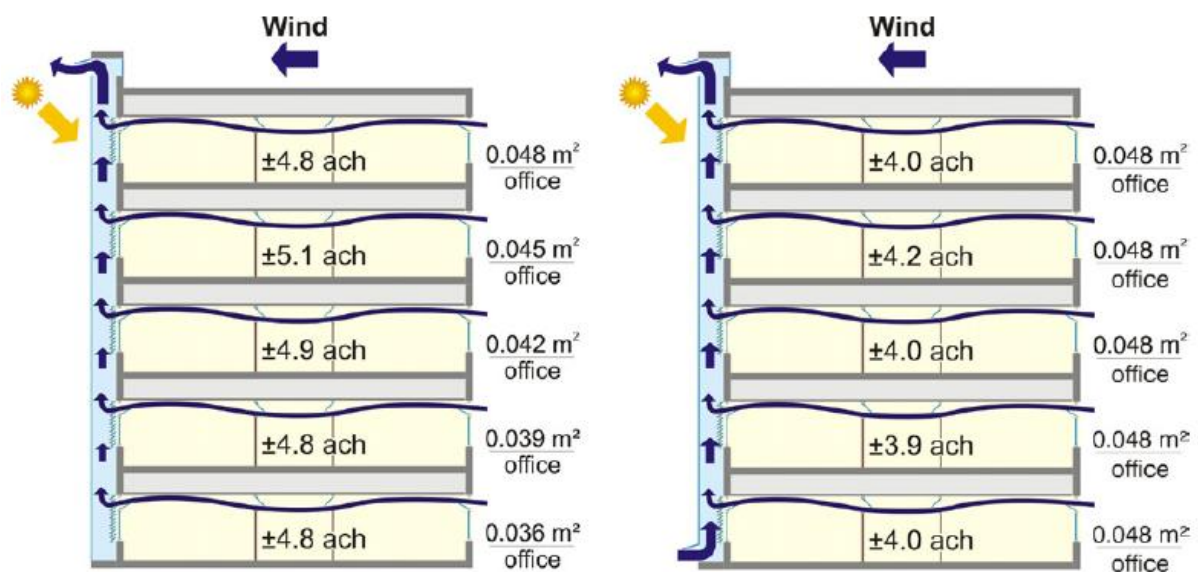


Figura 2.30. Taxa de renovação do ar e da circulação do ar quando fachada dupla ensolarada está a sotavento. FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2007-a. Figura da esquerda: abertura inferior da cavidade fechada e a superior aberta. Figura da direita: ambas as aberturas abertas.

Se a fachada dupla está a barlavento (a favor do vento - FIGURA 2.31), o fluxo de ar em no edifício é em grande parte devido ao vento e a direção do movimento do ar se inverte, exceto nos pisos inferiores, onde o efeito chaminé domina (quando somente a saída do ar superior está aberta).

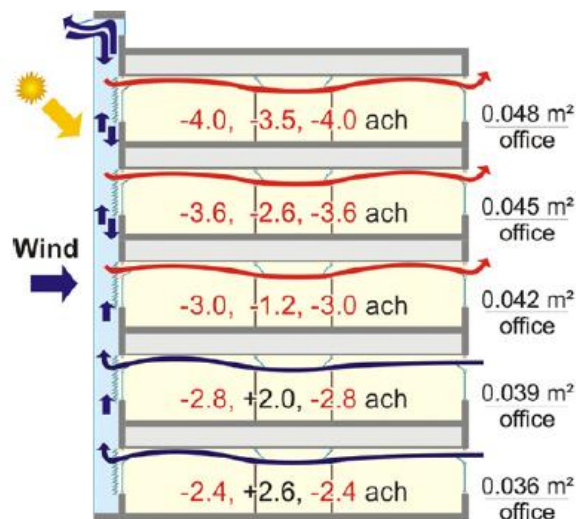


Figura 2.31. Taxa de renovação do ar e da circulação do ar quando fachada dupla ensolarada está a barlavento. FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a. Com o vento contra a fachada, há conflito entre o efeito chaminé e do vento na cavidade, causando a inversão do fluxo do ar nos pavimentos superiores (ar aquecido é insuflado para os ambientes).

Para melhorar a situação, considerando a fachada se elevando sobre o restante do edifício, é possível prever, na parte superior da cavidade, aberturas frontais e superiores (FIGURA 2.32).

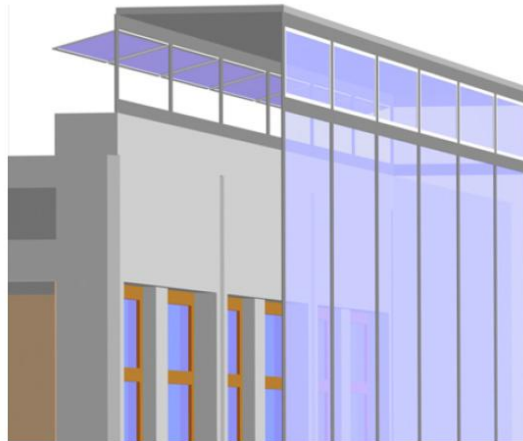


Figura 2.32 - Detalhe da fachada elevada sobre o edifício, com abertura da cavidade frontal e posterior.

FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a.

Sabendo a orientação do vento, apenas a abertura da janela onde a pressão é menor irá induzir a ventilação cruzada na direção desejada (FIGURA 2.33). Se somente a saída do ar na parte superior da dupla pele é aberta, o efeito do vento reduz a pressão na cavidade, e juntamente com o efeito chaminé é suficiente para garantir a ventilação. Abrir apenas a saída do ar é essencial, porque a abertura da entrada do ar no inferior da fachada a barlavento diminui a temperatura da dupla pele, eliminando o efeito de redução da pressão na cavidade e da velocidade do fluxo do ar.

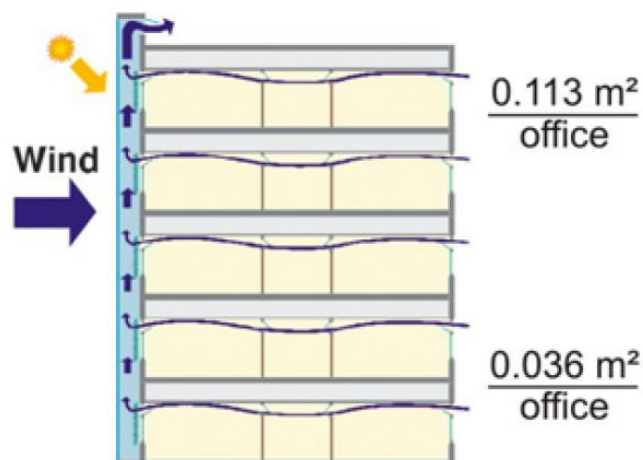


Figura 2.33 - A abertura da cavidade superior na face posterior evita a inversão do fluxo nos escritórios causada pelo vento contra a fachada. FONTE: GRATIA E HERDE, 2007-a.

Se o vento é paralelo à fachada, está protegida ou não há vento, a ventilação cruzada é induzida apenas pelo efeito chaminé na cavidade. Se apenas a saída do ar no topo da fachada permanece aberta, este efeito é suficiente para garantir o movimento adequado do ar. Quando não há ação do sol na fachada dupla, com a fachada dupla orientada a norte, as mesmas diretrizes devem ser aplicadas para garantir o funcionamento do sistema.

Este estudo auxilia na compreensão do comportamento das fachadas duplas ventiladas. Constatou-se que se a dupla pele é operada indevidamente, o resultado pode ser diferente do desejado. Em condições desfavoráveis de vento, o ar aquecido e contaminado é insuflado para os ambientes nos andares superiores, quando o edifício deveria ser resfriado. O estudo também mostrou a importância do uso dinâmico do sistema, conforme as condições climáticas. O edifício considerado neste estudo apresenta um elevado nível de isolamento térmico e uma forma de pavimento estreito que se adapta bem à estratégia de ventilação natural. As paredes internas entre gabinetes e corredores possuem janelas operáveis acima das portas para facilitar o fluxo de ar entre os espaços norte e sul. Assim, a ventilação cruzada foi possível, o que não é necessariamente verdade para edifícios com configurações diferentes.

O estudo conduzido por Gratia e De Herde (2007-a) analisa um edifício com fachada do tipo *multi-storey*. Segundo Uutu (2001), esta não é a tipologia mais indicada para uso de ventilação natural nos ambientes internos, justamente pela ocorrência de superaquecimento da cavidade na altura dos andares superiores. A associação das diretrizes recomendadas com outras tipologias, por exemplo a *shaft façade*, poderiam teoricamente levar a melhores resultados. Os aspectos mais interessantes deste trabalho são a análise do efeito da direção do vento, a introdução da estratégia de ventilação cruzada associada ao sistema e a definição de diretrizes que podem ser aplicadas diretamente ao projeto da fachada.

2.8.1.5 Fachadas duplas ventiladas mecanicamente

Segundo Li (2001), a fachada dupla ventilada mecanicamente faz uso de equipamentos para insuflar ar externo na cavidade e sistemas de exaustão para remover o calor e expelir ou recircular o ar, de forma a garantir boa distribuição de ar fresco. Com uso deste recurso, as fachadas do edifício podem ser seladas, tornando-se mais eficientes para isolamento acústico entre o interior e exterior, além de reduzir o risco de condensação ou poluição da cavidade, já que o ar externo é bombeado indiretamente. Em áreas de condições climáticas extremas ou com baixa qualidade do ar, a ventilação mecânica pode oferecer uma

proteção melhor das influências externas indesejadas no ambiente interno, por manter constante o desempenho da zona de transição propiciada pelo sistema.

A fachada dupla ventilada mecanicamente, também chamada de *active façade* (fachada ativa), caracteriza-se geralmente por apenas um modo de ventilação da cavidade, a *indoor air curtain* ou cortina de ar interno (BBRI, 2004). Nesta categoria, o ar vem do interior do ambiente e retorna para o mesmo, através de um sistema de ventilação. A fachada, portanto, é usada para extrair o ar dos ambientes conectados ao espaço intermediário. Quanto à compartimentação, os tipos usuais são a *corridor* e *box-window façade*.

A figura 2.34 apresenta, na classificação do BBRI (2004), as possibilidades tipológicas desta fachada.

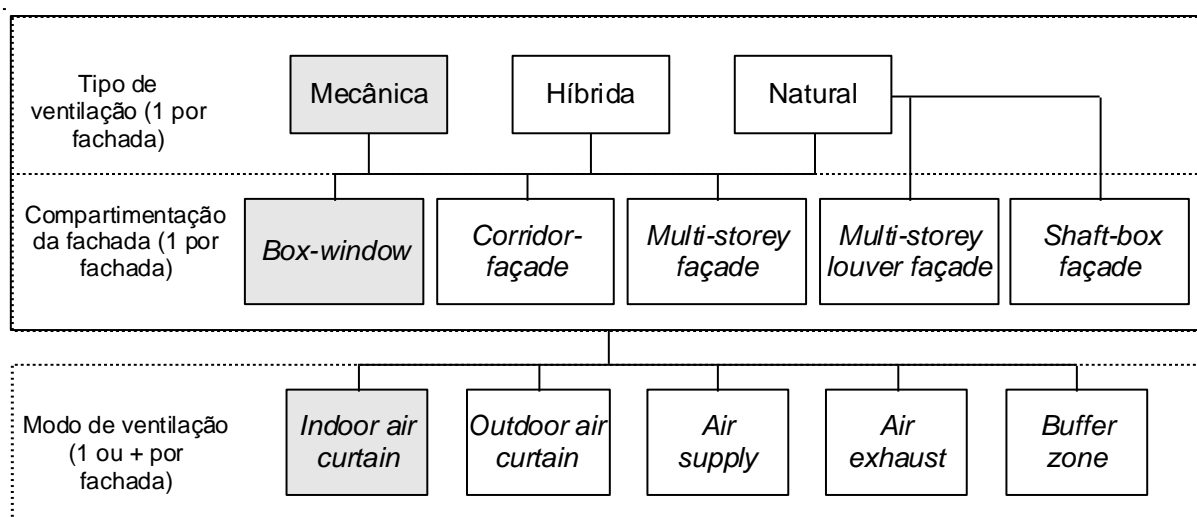


Figura 2.34. Características das fachadas duplas ventiladas mecanicamente. FONTE: BBRI, 2004.

Para a pele externa da fachada, o vidro deve ser duplo (isolante), enquanto a pele interna pode ser em vidro temperado e é mantida fechada, sendo aberta apenas para manutenção ou limpeza. A profundidade da cavidade varia entre 12 e 15 centímetros, o espaço necessário para integrar o dispositivo de sombreamento. Um pleno, conectado ao sistema de condicionamento do edifício, é instalado no topo do módulo da fachada para extrair uniformemente o ar da cavidade. As taxas de extração do ar ficam entre 30 e 50m³/h para cada metro da fachada (BBRI, 2004).

No período de aquecimento dos ambientes, o ar extraído dos ambientes para a fachada tem o objetivo de manter a pele interna com a mesma temperatura do interior, eliminando o efeito de desconforto por assimetria térmica. Com o uso de sistemas com recuperação de calor, o ar externo será pré-aquecido na cavidade.

No caso de alta incidência solar, os dispositivos de sombreamento são acionados para absorver ou refletir parcialmente a radiação, e o calor acumulado na cavidade é eliminado pelo sistema de condicionamento do edifício. No entanto, em comparação com fachadas simples, este tipo de funcionamento da fachada leva a aumento da demanda por resfriamento.

2.8.2 Transferência de calor

O desempenho térmico de um sistema como a fachada dupla ventilada é uma questão complexa. A transferência de calor⁹ ocorre simultaneamente em todas as camadas componentes da fachada (FIGURA 2.35) sob a influência das condições ambientais, das propriedades dos materiais das peles e do tipo de ventilação da cavidade (WONG, 2008).

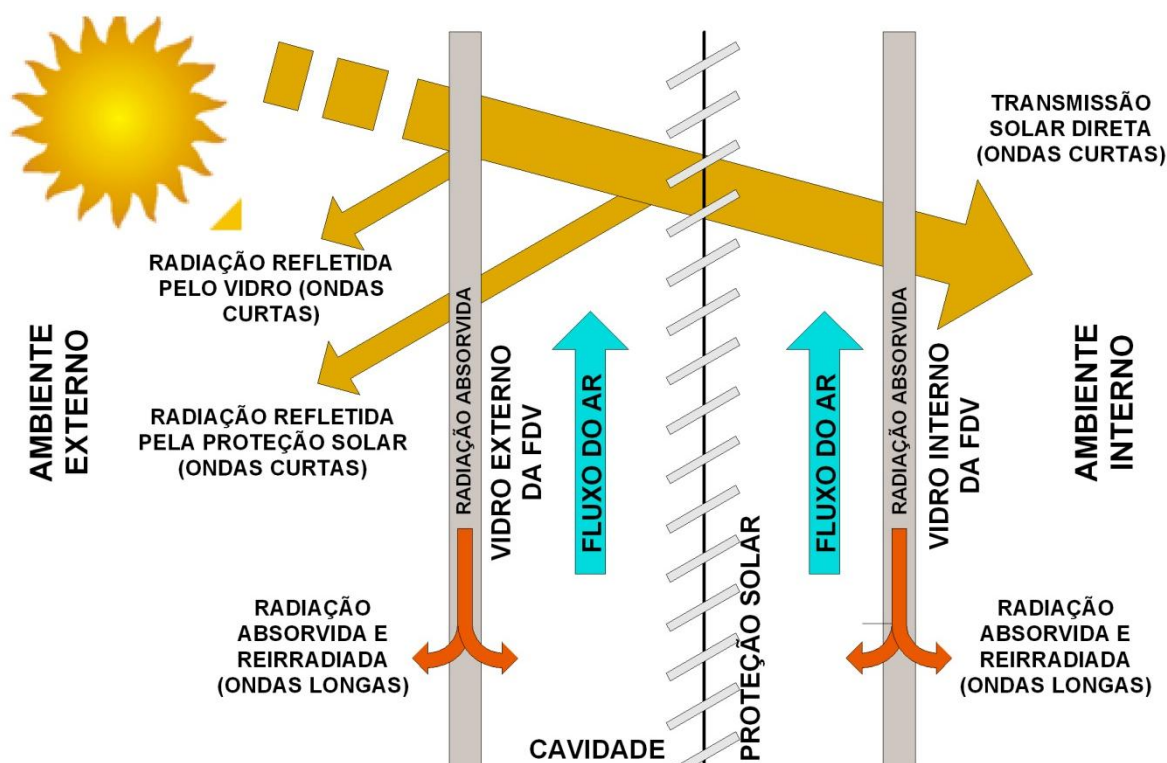


Figura 2.35. Esquema da transmissão de calor na fachada dupla ventilada. A radiação solar incidente sobre os fechamentos envidraçados da FDV é parcialmente refletida, absorvida e re-emitida, mas a maior parcela é transmitida diretamente para o ambiente interno. A proteção solar, quando presente na cavidade, pode barrar a maior parte desta transmissão solar direta, refletindo de volta para o exterior a radiação solar incidente. A radiação solar incidente aquece o ar da cavidade, promovendo o fluxo do ar na direção ascendente por efeito chaminé.

⁹ A transferência de calor acontece por radiação, condução ou convecção. A convecção acontece pelo movimento do ar causado pelas diferenças de temperaturas (o ar quente subindo e o frio descendo). Condução é o processo de transferência de energia de um material ao outro. A radiação, ou emissividade, ocorre quando o calor (energia) pode se mover pelo espaço através de ondas eletromagnéticas para um material e então ser transmitido, refletido ou absorvido.

Na FDV, a transferência de calor se dá pela condução dos elementos de fechamento do sistema (pele interna, externa e elemento de proteção solar), pela convecção (devido à movimentação do ar na cavidade em contato com os elementos de fechamento) e pela transmissão da radiação solar. O efeito da condução é mais significativo quando há presença de elementos opacos e de maior massa (como alvenarias ou vigas e pilares de concreto) na composição da fachada, já que o vidro, por sua pequena espessura, acumula pouco calor.

O comportamento físico das fachadas largamente envidraçadas é influenciado pelo mecanismo de como vidro responde ao ganho de calor solar¹⁰ (FIGURA 2.36).

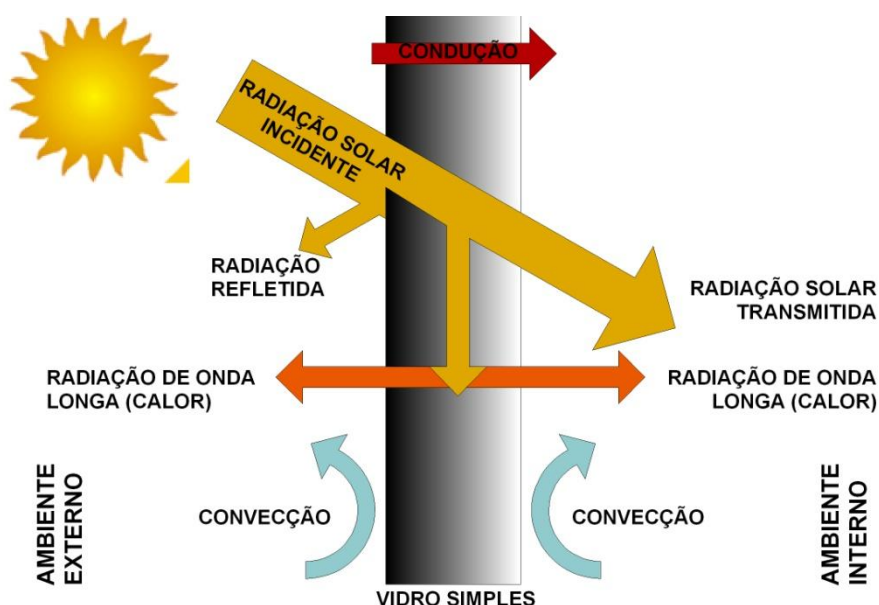


Figura 2.36 - Transferência de calor no vidro. A radiação solar incidente na fachada é parcialmente refletida ou absorvida pelo vidro, mas a maior parte é transmitida diretamente para o interior do ambiente. O vidro transmite radiação de onda curta (solar), mas é opaco para a transmissão de onda longa (calor).

Os elementos principais da transmissão de calor do espectro de luz são a luz infravermelha¹¹ (ondas longas) e luz visível¹², referidas como ondas curtas ou radiação de alta frequência solar. O vidro comum é quase transparente às ondas curtas, mas é uma barreira para a radiação de baixa frequência ou de onda longa. A energia do calor solar que passa através do vidro aquece a várias superfícies internas pela absorção e estas superfícies internas

¹⁰ O ganho de calor é a quantidade de calor que entra no interior de um edifício através do vidro por radiação e condução.

¹¹ Quando a radiação solar infravermelha curta é absorvida e irradiada pelo vidro, ela se converte em energia de onda longa.

¹² Luz visível é a porção do espectro eletromagnético cuja radiação pode ser captada pelo olho humano. Esta faixa do espectro situa-se entre a radiação infravermelha e a ultravioleta. A radiação solar apresenta um comprimento de onda entre 300 e 4000 nm. A ultra violeta está na faixa de 300 até 380 nm, a luz visível de 380 até 780 nm e radiação infravermelha de 780 até 4000 nm.

tornam-se radiadores de calor. Este calor re-emitido é, no entanto, de baixa frequência e, portanto, é armazenado no interior do ambiente promovendo o aumento da temperatura interna. Este calor pode ser dissipado por ventilação natural, mecânica ou ar condicionado (YELLAMRAJU, 2004).

O ganho de calor solar pelo vidro depende do fator solar (FS) do mesmo¹³. Quanto maior o fator solar, maior a contribuição do ganho solar para os ambientes. O vidro comum transparente tem FS igual a 0,87, dos quais 0,84 é ganho direto (transmissão solar direta) e 0,03 é ganho indireto (reirradiação). Existem vidros com maior tecnologia incorporada onde o FS é menor, reduzindo assim a transmissão de calor para o edifício – estes são conhecidos como vidros de controle solar. Atualmente, são utilizados os vidros refletivos de alta performance (FS de 0,27 a 0,40) ou os vidros baixo-emissivos (FS em torno de 0,35). Os vidros com revestimento baixo-emissivo (*Low-E*) reduzem a entrada direta de energia solar na construção. Antes do seu desenvolvimento, utilizavam-se vidros absorptivos (coloridos) ou revestimentos refletivos para reduzir a transmissão de energia solar. Porém, os vidros coloridos tendem a absorver e re-emitir uma maior quantidade de calor. Revestimentos refletivos são efetivos para reduzir o ganho de calor, mas também reduzem a entrada de luz visível (dependendo da cor, a transmissão de luz é de 13 a 30%). Os vidros baixo-emissivos (FIGURA 2.37) refletem menos luz visível, mas limitam a entrada de energia solar, permitindo redução dos custos de energia elétrica com ar-condicionado (SUNGUARD – MANUAL TÉCNICO).

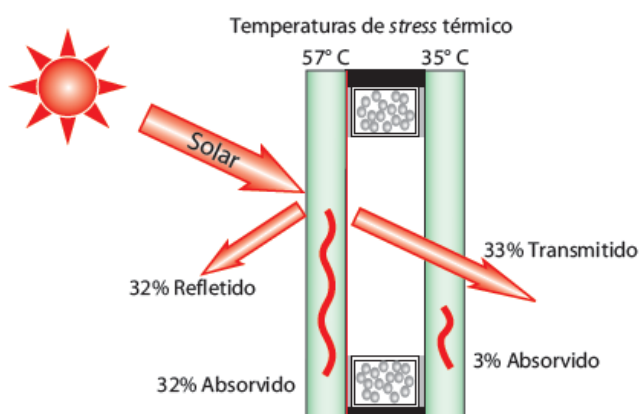


Figura 2.37 - Exemplo de transmissão solar em um vidro duplo de baixa emissividade. FONTE: Sunguard – Manual Técnico.

¹³ Fator solar é a porcentagem da radiação solar incidente no vidro transferida para os ambientes internos, direta e indiretamente através do envidraçamento. A porção de ganho direto é igual à transmissão de energia solar, enquanto a indireta é a fração da incidência da radiação solar no vidro que é absorvido e reirradiado ou conduzido.

O controle do ganho de calor solar com a FDV é conseguida através dos dispositivos de sombreamento e a capacidade da cavidade para absorver parte da radiação solar. O elemento de proteção solar, na cavidade, reflete parte da radiação solar incidente (ondas curtas) na direção do vidro externo e absorve a radiação restante, re-irradiando esta última como calor (onda longa). Como o vidro transparente é uma barreira para ondas longas, há pouca transferência, através do fechamento de vidro interno, do calor acumulado na cavidade para o ambiente. Assim, as cargas térmicas externas não aumentam como em uma fachada simples, impactando na necessidade de resfriamento do edifício. A cavidade funciona também para extrair continuamente o ganho de calor sensível através da ventilação da mesma. Com o uso de vidros com valores de transmissão de calor solar mais adequados, a absorção e reflexão de calor podem ser manipulados para minimizar o ganho de calor solar.

O acúmulo de calor na cavidade também pode ser denominado como efeito estufa. Gratia e de Herde descrevem este processo com mais detalhe em um artigo publicado em 2006. Quando a radiação solar¹⁴ atinge o fechamento externo, é parcialmente refletida, absorvida e transmitida (FIGURA 2.38 – figura 1). A radiação solar que atravessa o vidro é então absorvida pelo fechamento interior, que se aquece (FIGURA 2.38 – figura 2). Este re-emite em todas as direções uma radiação de onda longa (FIGURA 2.38 – figura 3). Esta radiação atinge a pele externa em consequência da pouca profundidade da cavidade. Quando esta radiação de ondas longas atinge a fachada externa, é parcialmente refletida e parcialmente absorvida (FIGURA 2.38 – figura 4). A fração absorvida é re-emitida em ambas as faces do vidro externo (interna e externa). Desta forma, parte da radiação de onda longa (a radiação re-emitida) mantém-se na cavidade, promovendo o aumento da temperatura do ar interior, devido à troca convectiva entre paredes e ar (FIGURA 2.38). Os elementos que influenciam este processo são a quantidade de radiação solar que penetra na cavidade, a porcentagem de envidraçamento da pele externa, o fator solar dos vidros, a orientação solar, a inclinação da pele externa e as máscaras solares geradas pelo ambiente e construção em si .

¹⁴ Transferência de calor por radiação solar - pode ser dividida em cinco tipos principais: radiação solar direta (onda curta), radiação solar difusa (onda curta), radiação solar refletida pelo solo e pelo entorno (onda curta), radiação térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu (onda longa) e radiação térmica emitida pelo edifício e pelos elementos do mesmo (onda longa). A radiação solar de onda curta que entra por uma abertura no edifício incide sobre os elementos da construção e mobiliário, que se aquecem e emitem radiação de onda longa. O vidro é praticamente opaco à radiação de onda longa e não transmite o calor interno para o exterior, aquecendo o ambiente interno. Este processo é conhecido como efeito estufa.

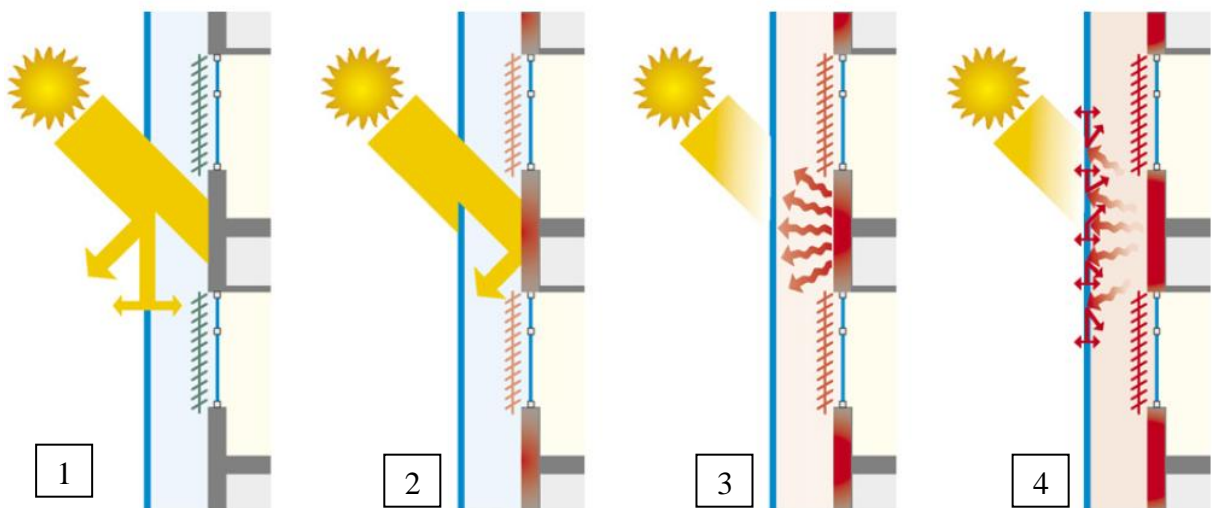


Figura 2.38 - Transferência de calor por radiação solar na FDV . FONTE: GRATIA E DE HERDE, 2006

O calor gerado por este processo, no interior da cavidade, pode ser retirado pela ventilação do espaço intermediário quando necessário (na condição de dias de maior calor), como já mencionado anteriormente. De outra forma, o calor aprisionado no interior da cavidade mantém melhor condição de conforto em dias de frio, por proporcionar menor perda de calor da pele interna (como a diferença de temperatura entre o ambiente e a cavidade é menor do que com o ambiente externo, a transferência de calor é reduzida) e maior isolamento da fachada.

Saelens *et al.* (2003) descrevem o sistema térmico da FDV da seguinte forma: nas superfícies da cavidade (peles externas, peles interna e dispositivo de sombreamento), os três modos de transferência de calor ocorrem: condução (Q_{cond}) nos fechamentos e elemento de proteção solar, convecção (Q_{conv}), na cavidade, e radiação (Q_r) (FIGURA 2.39).

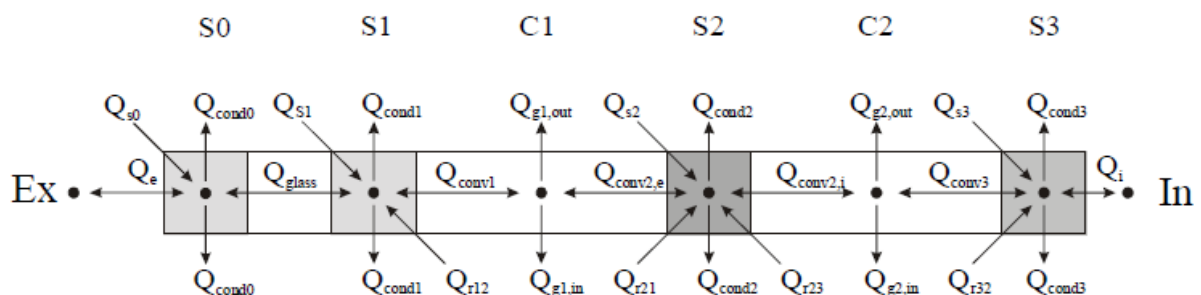


Figura 2.39. Diagrama do modelo de transferência de calor e fluxo do ar da FDV com dispositivo de sombreamento. FONTE: SAELENS, 2003.

S0 e S1 – Vidros da pele exterior (vidro duplo). S2 - Dispositivo de sombreamento.

C1 – Cavidade exterior. C2 – Cavidade interior. S3 – Vidro interno.

A transferência de calor convectivo (Q_{conv}) depende da taxa de fluxo de ar e da diferença de temperatura entre as superfícies e o ar. A energia solar absorvida é representada

na figura 2.39 como Q_s , e depende do ângulo de incidência e do sombreamento parcial dos painéis. A transferência de calor, tanto para os ambientes internos quanto para o exterior, serão em função dos fluxos de calor combinados.

Coefficientes globais de transferência de calor, como a transmitância térmica (*U-value*) e o ganho de calor solar (SHGC) são comumente estudados para determinar o comportamento térmico das fachadas. No entanto, valores constantes de transmissão de calor e do fluxo do ar, assim como a suposição de condições ambientais estáveis, não poderiam ser aplicados diretamente a fachadas duplas ventiladas (POIRAZIS, 2006). Os coeficientes *U-value* e SHGC das FDV podem variar no tempo.

Segundo o relatório do BBRI (2004), não existem regras gerais sobre o desempenho térmico das FDV que se apliquem a todos os conceitos existentes. Este desempenho é muito dependente do tipo de fachada, da estratégia de controle adotada dos dispositivos integrados (como o recurso de proteção solar), das condições climáticas, entre outros. A distinção também deve ser feita entre o desempenho em um determinado momento em particular sob condições bem conhecidas e desempenhos anuais calculados integrando todos os modos de configuração da fachada.

Em resumo, são três os processos físicos que governam o desempenho da FDV: o elemento fluxo do ar, o elemento térmico e o elemento ótico/ solar (POIRAZIS, 2006). O fluxo do ar, como já descrito, é variável, para as cavidades ventiladas naturalmente, e constante, para as ventiladas mecanicamente. O elemento térmico relaciona-se com a transferência de calor, incluindo condução dos materiais, convecção e radiação. O elemento ótico ganha importância devido ao uso de grandes áreas envidraçadas e de dispositivos de sombreamento. Desta forma, as propriedades óticas de transmissão, refletância e absorvância¹⁵ da radiação solar incidente devem ser consideradas, e se alteram de acordo com o comprimento de onda, ângulo de incidência solar e polarização¹⁶.

Diferentes abordagens na análise do desempenho global do sistema de FDV, considerando os três processos físicos principais, são possíveis, negligenciando algum dos

¹⁵ Absortância é a fração absorvida da radiação incidente sobre uma superfície real.

¹⁶ Toda onda eletromagnética e, portanto, a luz, tem uma propriedade chamada de polarização, que descreve como o campo elétrico se propaga. Alguns cristais têm a propriedade de **polarizar** a luz: só deixam passar a parte da onda que oscila num determinado plano.

processos ou enfatizando todos. Este assunto é apresentado extensivamente no item 3.2 - Abordagens de simulação para as fachadas duplas ventiladas.

Gan (2001), por exemplo, apresentou um método numérico desenvolvido para a previsão de transmissão térmica de FDV, baseando-se em um software de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Segundo o autor, a resistência térmica prevista dos fechamentos se aproxima dos dados de referência para a unidade de vidros duplos. Os resultados confirmam que o coeficiente de transmissão térmica, a resistência térmica e transmitância térmica variam com a profundidade do espaço entre os painéis de vidro a partir da dimensão de 25 mm. Com o aumento da profundidade da cavidade, a resistência térmica aumenta, enquanto o valor de U diminui. É demonstrado também que o coeficiente convectivo e a transmitância térmica aumentam linearmente com a diferença de temperatura entre os planos envidraçados. Além disso, o efeito da diferença de temperatura na cavidade sobre o coeficiente de convecção é significativo. Neste estudo, a ênfase foi dada ao elemento térmico, não sendo consideradas as especificidades do fluxo do ar e das propriedades óticas e solares.

2.8.2.1 Balanço térmico

Todorovic e Maric (2001), por outro lado, desenvolveram um estudo sobre o desempenho de FDV a partir da resolução do balanço térmico global do sistema, incluindo a análise dos seguintes elementos:

- Temperaturas das superfícies da FDV.
- Transmissão de radiação solar.
- Transferência de calor por convecção.

O balanço térmico é um método de análise com o objetivo de analisar os ganhos e as perdas de calor através dos componentes opacos, originados por cargas energéticas internas e cargas externas incidentes na envoltória do edifício. São utilizadas equações termodinâmicas de equilíbrio térmico para o cálculo dos fluxos de calor através dos sistemas (neste caso, a transferência de calor entre o meio exterior e o edifício pela fachada dupla), considerando a condução, convecção e transmissão solar dos elementos.

A FDV estudada no artigo é do tipo corredor, constituindo um módulo de 5 metros de largura e 3,2 metros, representativa de uma unidade de um edifício de escritórios. A pele externa é envidraçada, enquanto a pele interna compõe-se de uma janela de 1,2 metro de

altura ao longo de toda a largura do módulo sobre um peitoril de alvenaria. A profundidade da cavidade varia entre 60 e 120 centímetros. A localização é norte da Europa.

Para calcular as perdas e ganhos de calor da fachada, as temperaturas do ar intersticial foram calculadas em função da temperatura da pele exterior e da pele interna. Os cálculos propostos baseiam-se na solução de um conjunto de equações simultâneas para cada período de tempo desejado. O primeiro passo do método de Todorovic e Maric (2001) é determinar as temperaturas de todas as superfícies do módulo da FDV. Para cada pele, é calculada a temperatura resultante na superfície pelo balanço da energia solar absorvida pelos fechamentos, reemitida por ondas longas e por convecção. Em seguida, são calculados os ganhos ou perdas do ar na cavidade, tanto para o ar estanque ou em movimento (neste último, a velocidade do fluxo foi calculada e considerada constante). O balanço global é dado pelo somatório de todos estes resultados. Os valores foram determinados como o valor médio para cada uma hora durante o período de um dia.

Foram considerados os seguintes processos físicos, para o cálculo da temperatura do fechamento externo:

- Radiação solar : no balanço térmico, a energia absorvida pelo vidro é perdida pela combinação de onda longas de radiação das superfícies exteriores e interiores da fachada, representados na equação como Q1 e Q3, respectivamente. Estes representam a absorção, condução e emissão da radiação solar dos fechamentos envidraçados para a cavidade e para o exterior.
- Convecção: a partir de suas superfícies externas e internas (Q2 e Q4, respectivamente).

O ganho de calor (Q_{ai}) pela fachada externa em equilíbrio térmico é:

$$Q_{ai} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

O cálculo das temperaturas da superfície envidraçada (s) externa é dado pela equação (onde s1 está em contato com o exterior e s2 com a cavidade):

$$t_s = \frac{\alpha_s F_s I_1 + (\varepsilon_{s1} F_s C_e \beta_{s1} + \alpha_{s1} F_s) t_o + (\varepsilon_{s2} F_s C_e \beta_{s2} + \alpha_{s2} F_s) t_m}{(\varepsilon_{s1} F_s C_e \beta_{s1} + \alpha_{s1} F_s) + \varepsilon_{s2} F_s C_e \beta_{s2} + \alpha_{s2} F_s}$$

Onde:

a - coeficiente de absorção de radiação solar [%]

I - intensidade da radiação solar através do vidro comum [W/m²]

F- área [m²]

- ε - emissividade
- C - calor específico do ar - $C_p = 1005 \text{ J/kgK}$
- β - coeficiente de temperatura $\beta = 1,1$
- t_o - temperatura do ar externo [$^{\circ}\text{C}$]
- t_s - temperatura do vidro
- t_m - temperatura média da cavidade

Analisando as variáveis da equação do balanço, a temperatura do vidro depende, portanto, das temperaturas externas e internas da cavidade e das propriedades específicas do material vidro.

A radiação solar transmitida através do fechamento exterior atinge a janela e a parede do fechamento interno. A janela responde à radiação incidente da mesma maneira como o descrito para a pele exterior: o vidro da janela absorve uma parte da energia radiante que incide (Q_{a2}), que depois é emitida como radiação de ondas longas (Q_5 e Q_7) e convecção (Q_6 e Q_8), respectivamente, para a cavidade para o ambiente interno do edifício. A equação que representa o equilíbrio é dada por:

$$Q_{a2} = Q_{a5} + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$$

O cálculo das temperaturas da janela interna é dado pela equação (onde p_1 é a face em contato com a cavidade e p_2 a face em contato com o ambiente):

$$t_p = \frac{\alpha_p F_p I d_s + (\varepsilon_{p1} F_p C_c \beta_{p1} + \alpha_{p1} F_p) t_m + (\varepsilon_{p2} F_p C_c \beta_{p2} + \alpha_{p2} F_p) t_u}{\varepsilon_{p1} F_p C_c \beta_{p1} + \alpha_{p1} F_p + \varepsilon_{p2} F_p C_c \beta_{p2} + \alpha_{p2} F_p}$$

A figura 2.40 representa as equações de ganho de calor Q_{a1} e Q_{a2} descritos acima.

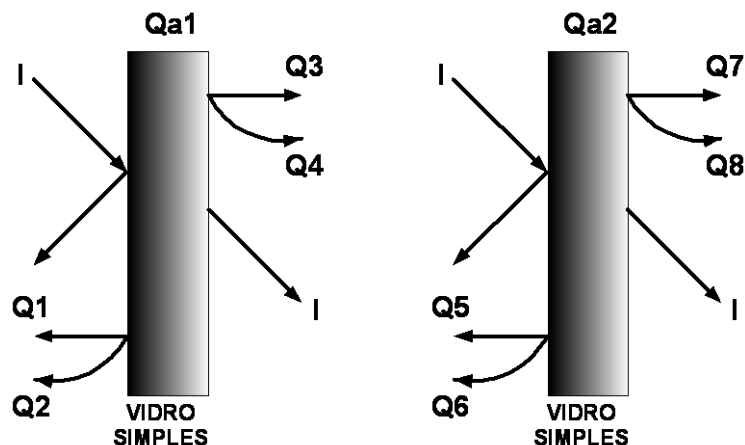


Figura 2.40 - Esquema do ganho de calor pela FDV (fechamento externo, cavidade e fechamento interno), considerando a radiação solar (I) incidente, a radiação absorvida (Q_{a1} e Q_{a2}), reemitida (Q1, Q3, Q5 e Q7) e o ganho por convecção (Q2, Q4, Q6 e Q8).

O calor solar absorvido pela parede interna (Q_{a3}) é transmitido por convecção (Q9) e por radiação (Q10) de volta para a cavidade, e por condução (Q12) através da parede para o ambiente interno. A radiação de comprimento de onda longa (Q11) é insignificante para a precisão do estudo desenvolvido. O ganho de calor e a temperatura da superfície da parede são determinados pelas equações:

$$Q_{a3} = Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12}$$

E:

$$t_z = \frac{\alpha_x F_x I_1 d_s + \alpha_{x1} F_x t_m + \frac{\lambda_x}{\delta_x} F_x t_u}{\alpha_{x1} F_x t_m + \frac{\lambda_x}{\delta_x} F_x t_u}$$

Onde:

a - coeficiente de absorção de radiação solar [%]

I - intensidade da radiação solar através do vidro comum [W/m²]

F - área [m²]

δ - espessura da parede de alvenaria [m]

λ - coeficiente de transferência de calor por condução [W/m²K]

t_u - temperatura interna do edifício [°C]

t_m - temperatura média da cavidade [°C]

O balanço térmico inclui a radiação solar incidente no espaço e a radiação solar absorvida pelos vidros, que é então liberada por meio de ondas longas e convecção para o ambiente interno e externo. Neste documento, a FDV é considerada uma única zona onde o equilíbrio térmico é definido para dois casos, um quando o ar está capturado na cavidade (modo de isolamento térmico) e outro quando o ar entra na zona e sai com uma temperatura mais elevada (*outdoor air curtain* ou cortina de ar externo).

No segundo caso, a transferência de calor depende do fluxo de ar, ou seja, na velocidade do fluxo de ar. Foram utilizadas duas velocidades calculadas para o fluxo do ar na cavidade: 0,25 e 2 m/s. Esta ventilação tem a função de extrair parte do calor acumulado na cavidade. A equação do cálculo da transferência de calor (neste caso, perda de calor) considerando a ventilação da cavidade é:

$$Q_v = \rho_a C_p D L_w (t_{iz} - t_{ul}) / 3600$$

ρ - densidade do ar [$\sim 1 \text{ kg/m}^3$]

C - calor específico do ar - $C_p = 1005 \text{ J/kgK}$

D - profundidade da cavidade [m]

- L - largura da cavidade [m]
- w - velocidade do ar na cavidade [m/s]
- t_{iz} - temperatura de saída do ar [°C]
- t_{ul} - temperatura de entrada do ar [°C]

As variáveis que influenciam o cálculo da transferência de calor na cavidade são as suas dimensões (profundidade e largura), velocidade do fluxo do ar na cavidade (neste caso, valores fixos calculados) e a temperatura de entrada e saída do ar.

O balanço térmico para a condição de isolamento térmico (FIGURA 2.41) é dada por (onde Q₁₃, Q₁₄ e Q₁₅ são as transmissões de calor através da parede, base e do fechamento externo):

$$Q_V = Q_4 + Q_6 + Q_{10} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15}$$

E a temperatura da cavidade é dada por:

$$t_m = \frac{2\rho_a c_p D L w t_{ul} + k_s F_s t_o + (k_p F_p + k_x F_x) t_u + \alpha_{s2} F_s t_s + \alpha_{p1} F_p t_p + \alpha_{x1} F_x t_x}{2\rho_a c_p D L w + k_s F_s + k_p F_p + k_x F_x + \alpha_{s2} F_s + \alpha_{p1} F_p + \alpha_{x1} F_x}$$

Onde k é o coeficiente de transferência de calor [W/m²K] global.

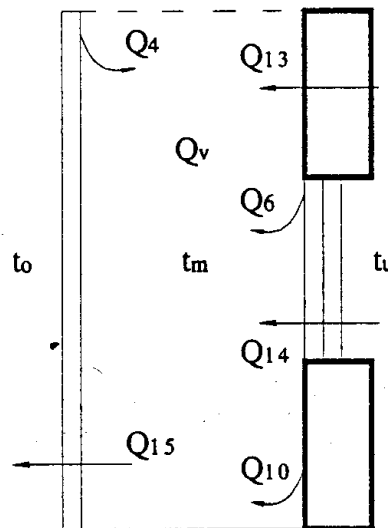


Figura 2.41 - Esquema do ganho de calor na cavidade, no modo isolamento térmico (sem ventilação).

O método de balanço térmico, como o descrito do artigo de Todorovic e Maric (2001), pode auxiliar na compreensão mais detalhada dos processos físicos englobados pelo uso da FDV, assim como das variáveis envolvidas. No entanto, é um método limitado pela exigência de solução manual de equações simultâneas (equações onde há mais de uma

variável dependente desconhecida) e por não modelar a variação do fluxo do ar na cavidade, além de não considerar períodos de tempo maiores (como simulações de ano inteiro). Como explanado no capítulo 3, abordagens com simulação computacional, utilizando de programas de balanço térmico com modelagem do fluxo do ar, podem trazer resultados mais precisos e em períodos maiores de tempo, englobando todas as estações climáticas do ano.

2.8.3 Influência do tipo de vidro no desempenho térmico das FDV

Chan *et al.* (2009) desenvolveram um estudo sobre a influência de diferentes combinações de tipos vidros no desempenho energético de um edifício com FDV. Simulações computacionais foram realizadas utilizando os dados meteorológicos de Hong Kong, para período de um ano inteiro, focando a necessidade de resfriamento dos ambientes internos. Três tipos de vidro foram investigados: transparente, absorvivo e reflexivo. Os planos envidraçados consideram o uso de painéis de vidro simples e duplo.

Para determinar a eficiência do uso de FDV, o edifício estudado também foi simulado considerando o uso de uma fachada convencional. Para as simulações, foi utilizado o programa *EnergyPlus*. Como será explicado posteriormente, este artigo descreve também a execução de um experimento para validar o uso do *EnergyPlus* para previsão do comportamento das FDV.

As orientações das FDV no edifício estudado são norte, leste, sul e oeste, e a planta tipo tem 36 x 36 metros. A cavidade da fachada dupla tem profundidade de um metro e altura igual ao do pavimento, 3,4 metros. A relação *wwr* (*window to wall ratio* ou proporção entre fechamentos envidraçados e opacos) é de 60%. A temperatura interna de projeto, mantida através de ar condicionado, é de 24° C para o verão e 21° C para o inverno.

A variação das composições de diferentes tipos de vidro para as fachadas resultou em diferentes desempenhos energéticos, em comparação com o modelo de fachada convencional. O autor usou o posicionamento das configurações dos vidros, no total de quatro, da seguinte forma: simples internamente e externamente, simples internamente e duplo externamente, duplo internamente e simples externamente e duplo nas duas peles.

Segundo Chan *et al.* (2009), uma prática usual é aplicar o painel de vidro duplo na pele interna, e vidro simples na pele externa. No entanto, pelo estudo conduzido, os melhores desempenhos estão associados às configurações de vidro simples internamente e duplo externamente e duplo nas duas peles, com aproximadamente 26% de redução anual no

consumo de energia para resfriamento. Como a diferença entre as duas configurações é pequena, a primeira alternativa foi considerada mais adequada, por ser mais econômica no investimento inicial.

Analisando os resultados das simulações das FDV, os desempenhos dos modelos com vidros refletivos se apresentaram superiores às outras combinações. Como conclusão, os autores colocam que o uso de FDV em edifícios pode reduzir a transmissão de calor e o consumo de energia elétrica para condicionamento do ar, mesmo em regiões com clima subtropical.

2.8.4 A influência dos dispositivos de sombreamento no desempenho térmico das FDV

O uso de elementos de sombreamento no interior da cavidade, protegidos das intempéries, resulta na subdivisão do espaço intermediário em dois, e seu posicionamento irá representar um aspecto importante para a distribuição dos ganhos de calor do sistema (POIRAZIS, 2006).

A posição do dispositivo de proteção solar, no interior da cavidade, influencia a transferência de calor para o interior dos ambientes, o estresse térmico nas peles envidraçadas e o fluxo do ar. Localizados muito próximos à pele interior, poderão prejudicar o fluxo de ar em volta do elemento de sombreamento, provocando o aumento da temperatura junto às janelas e conseqüente maior transferência de calor por condução e radiação para o espaço interno. Este efeito pode ser indesejável e independe da abertura ou não das janelas internas (OESTERLE, 2001).

Segundo Oesterle (2001) e Lee *et al.* (2002), os elementos de sombreamento devem ser posicionados junto à pele externa e de forma a permitir a circulação adequada do ar à sua volta. A localização ideal corresponde ao 1/3 externo da profundidade da cavidade, respeitando as aberturas de entrada e saída do ar. Para evitar o superaquecimento também junto ao pano externo, uma distância de 15 cm deve ser respeitada entre o elemento e a fachada (POIRAZIS, 2006). O recurso de sombreamento mais indicado por Jager (2003), citado por Poirazis (2006), são as venezianas. Persianas, cortinas tipo rolô ou brises também são utilizadas. Segundo o autor, a absorvância do elemento não deve exceder 40%.

Gratia e De Herde (2007-b) desenvolveram um estudo sobre a posição mais eficiente dos dispositivos de sombreamento em uma fachada dupla ventilada. Três posicionamentos do

dispositivo foram adotados nas simulações: próximo ao fechamento interno, no meio da cavidade e junto ao fechamento externo.

Foi analisada também a influência da cor do dispositivo, caracterizada da seguinte forma:

- Cor média: coeficiente de absorvância solar igual a 0,42 e coeficiente de reflexão solar igual a 0,40.
- Cor clara: coeficiente de absorvância solar igual a 0,17 e coeficiente de reflexão solar igual a 0,65.

As simulações foram realizadas para um edifício de escritórios cuja fachada interna é bem isolada e com janelas operáveis, nas condições climáticas da Bélgica. Com a fachada dupla aberta (ventilando naturalmente), a escolha criteriosa da localização do recurso de sombreamento resulta em economia de até 13,9% do consumo de energia para resfriamento do edifício durante um dia ensolarado de verão. A melhor combinação é o posicionamento central com a cor clara.

Os autores apontam também a importância do uso de estratégias passivas (ventilação natural da cavidade e uso de dispositivos de sombreamento) para a melhora da eficiência energética do edifício no geral. Resultados de simulações, realizadas em outros estudos, demonstraram que a adição da dupla pele diminui a demanda por aquecimento em até 13%. Se nenhuma estratégia natural é aplicada para tentar diminuir o consumo por resfriamento, a adição de segunda pele com orientação sul, por exemplo, a carga de refrigeração aumenta em 19,7%. Isto ocorre pela significativa transferência de radiação solar direta e transmissão de calor para os ambientes através das janelas.

O uso de dispositivos de sombreamento também impacta no conforto dos usuários. No período de verão, o vidro da fachada interna pode chegar a temperaturas elevadas, devido ao superaquecimento do ar na cavidade e a radiação proveniente dispositivo. Assim, o estudo da melhor posição da proteção solar diminui a temperatura da pele interna, reduzindo a demanda por condicionamento do edifício e aumentando o conforto dos ocupantes.

3. DIRETRIZES DE PROJETO E DE SIMULAÇÃO PARA FACHADAS DUPLAS VENTILADAS

De acordo com Li (2001), como o sistema de fachadas duplas ventiladas é fortemente dependente das condições externas (como a radiação solar e temperatura externa), já que estas influenciam o clima interno, deve ser projetado considerando as particularidades de seu contexto e orientação da fachada, de outra forma, o desempenho não será satisfatório. Em outras palavras: a individualidade do projeto da fachada é a chave para o alto desempenho. O texto a seguir aborda os temas: diretrizes de projeto, parâmetros de desempenho e modelos e ferramentas de simulação para as fachadas duplas.

3.1 Diretrizes de projeto

Assim, os limitantes que devem ser considerados já no estágio inicial do projeto, como apresentadas por Poirazis (2004), são:

- O clima do local.
- A implantação, incluindo a latitude, condições atmosféricas, obstruções externas, refletância do solo, entre outros.
- O uso do edifício, incluindo a determinação das atividades, períodos de ocupação, entre outros.
- Normas e regulamentos legais que podem incidir sobre o projeto de edifícios.

Os parâmetros de projeto, que devem ser estudados a fim de melhorar o desempenho da fachada dupla e assegurar a redução do consumo de energia e garantir as condições de conforto, são (POIRAZIS, 2004):

- Projeto e tipologia da fachada, conforme as classificações apresentadas na revisão bibliográfica.
- Projeto da estrutura da fachada.
- Geometria da cavidade.

- Origem e destino do ar no interior da cavidade, tipo de ventilação desta, uso de ventilação noturna e conexão com sistema de HVAC¹⁷ do edifício.
- Combinação do material do fechamento e dispositivo de sombreamento de acordo com a orientação e tipo de fachada.
- Princípios das aberturas da cavidade, da pele interna e da pele externa.
- Tipo dos fechamentos em vidro (vidro simples ou duplo, colocado na pele exterior ou na interior).
- Tipo de dispositivos de sombreamento (venezianas, brises, persianas ou cortinas tipo rolô).
- Escolha dos materiais para as peles e para os dispositivos de sombreamento.
- Posicionamento dos dispositivos de sombreamento (interno, intermediário ou externo).

A análise destes aspectos deve considerar a fachada integrada ao funcionamento do edifício como um todo, e suficientemente detalhada para determinar a melhor configuração entre as opções disponíveis a fim de atingir o desempenho pretendido.

O estudo das propriedades físicas no interior da cavidade é fundamental para compreender o desempenho da fachada dupla ventilada. A geometria da fachada influencia o fluxo de ar e, conseqüentemente, as temperaturas em diferentes alturas da cavidade. Diferentes painéis e dispositivos de sombreamento resultam em diferentes propriedades físicas. As dimensões e localização das aberturas da pele exterior podem influenciar o tipo de fluxo e temperatura do ar da cavidade. Todos estes parâmetros determinam a utilização da fachada dupla ventilada e a estratégia de HVAC que deve ser planejada para obter o melhor desempenho do sistema (POIRAZIS, 2004).

Oesterle *et al.* (2001) recomendam alguns passos para o planejamento dos diversos tipos de fachadas duplas ventiladas. São eles:

1. Verificar as restrições - a adequação do uso estratégias de ventilação natural para os ambientes com os sistemas de fachada disponíveis, e a viabilidade econômica dos sistemas.
2. Determinar a configuração da fachada - análise da matriz de requisitos para determinar a forma e construção apropriada da fachada.

¹⁷ HVAC surge do termo em inglês *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, o termo é relacionado a sistemas que utilizam estas técnicas: aquecimento, ventilação e ar condicionado.

3. Garantir um bom suprimento de ar fresco - planejamento das dimensões das aberturas e das rotas de fluxo de ar na cavidade e nos ambientes.
4. Evitar o superaquecimento da cavidade - o fluxo de ar é projetado de tal forma que o ganho de calor não aumenta de andar em andar.
5. Otimizar o fluxo de ar – determinar o tamanho e a posição das aberturas adequadamente, acrescentando propulsão extra quando necessário.
6. Planejamento das condições de operação - variando o tamanho das aberturas para os requisitos de isolamento térmico e acústico.
7. Testar as concepções de fachada - a integração física do edifício e da tecnologia de ventilação do sistema de fachada com o conceito de ventilação mecânica.
8. Integração de clientes e usuários no planejamento – a otimização do processo global do sistema exigirá participação de todos os envolvidos na fase de planejamento para assumir uma parcela de responsabilidade.
9. Tendo os mecanismos de controle em funcionamento - coordenar o ajuste das funções de fachada e ventilação mecânica e dar tempo para o processo de ajuste antes da ocupação do edifício.

Como o sucesso do sistema de fachada depende muito do entendimento da sua funcionalidade, as recomendações acima representam orientações gerais aos projetistas e usuários. Na pesquisa, os itens deste assunto relevantes para o estudo serão apresentados com maior profundidade no capítulo de estratégia de pesquisa, quando se apresenta o protocolo de realização das simulações.

3.1.1 Parâmetros de desempenho na concepção das fachadas duplas ventiladas

Segundo Doebber e McClintock (2006), não existem atualmente orientações gerais sobre como projetar ou analisar fachadas duplas ventiladas. Também não há padronização ou regulamentação específica, por parte das agências de engenharia ou de fabricantes, para caracterizar o desempenho do sistema.

Por isso, o desempenho térmico das fachadas duplas é definido utilizando os mesmos parâmetros das fachadas tradicionais: coeficiente de ganho de calor solar (SHGC), fator U e temperatura interna dos vidros; acrescido de dois parâmetros para definir o comportamento térmico e dos fluidos no espaço intermediário da fachada: fluxo de ar e temperatura da cavidade. Os parâmetros das fachadas típicas não são ideais para definir o desempenho das fachadas duplas. Como visto anteriormente, o SHGC e fator U para uma

fachada dupla terá uma variabilidade muito maior do que com um sistema de fachada convencional. Além disso, estes fatores variam de acordo com o pavimento devido à diferença de temperatura considerável em toda a altura da cavidade do ar.

A temperatura interna dos vidros é outro parâmetro típico de desempenho de fachadas, porque tem um grande efeito sobre o conforto térmico dos ocupantes da zona de perímetro. Segundo a ASHRAE¹⁸ 55, a diferença de temperaturas das superfícies em torno de um indivíduo sedentário em um ambiente deve estar entre 5 e 10 graus Fahrenheit. Já a ISO 7730/94¹⁹ diz que a assimetria da temperatura radiante devido a janelas ou outras superfícies verticais frias deve ser menor que 10°C (relativa a um pequeno plano vertical localizado a 0,6 m acima do piso). Qualquer superfície que excede este intervalo causa desconforto por assimetria térmica.

Os parâmetros adicionais utilizados para definir o desempenho de um sistema de fachadas duplas incluem o fluxo de ar e temperatura na cavidade. Estes parâmetros mostram quão bem a fachada expõe o calor formado no espaço intermediário durante o período de verão, e sua capacidade para fornecer ventilação natural entre a cavidade e os espaços adjacentes. Semelhante ao SHGC e o fator U, não existem procedimentos padronizados para calcular estes parâmetros.

3.1.2 Processos de análise para projeto de fachadas duplas ventiladas

Doebber e McClintock (2006) apresentam um artigo sobre o processo de análise pelo qual os autores otimizaram a configuração do sistema de fachadas duplas e seus componentes, para um determinado projeto. O objetivo a ser alcançado pela otimização é criar um sistema de fachada que reúna conforto térmico e desempenho energético, exigido pela equipe de *design* ou códigos de construção. Os autores buscam atingir estas metas traduzindo os requisitos de desempenho em restrições de desempenho ao nível do sistema fachada e, em seguida, ao nível das componentes da fachada (FIGURA 3.1). Para tanto, uma série de programas de simulação são aplicados nas diferentes fases de planejamento da fachada.

¹⁸ ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) é a Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado.

¹⁹ ISO 7730/94 - *Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico*. Esta norma propõe um método de determinação da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas expostas a ambientes térmicos moderados e especifica condições térmicas aceitáveis para o conforto.

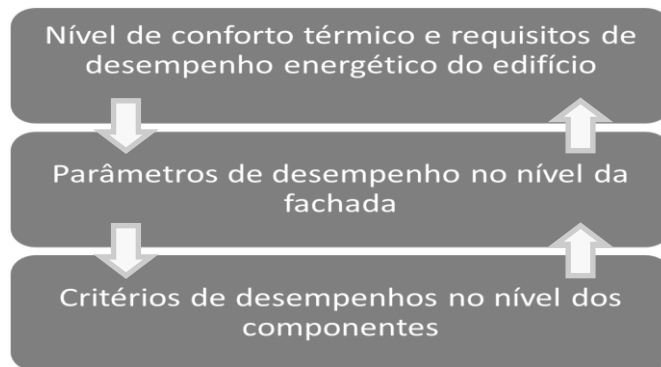


Figura 3.1. Fluxograma do processo geral para a concepção e análise de um sistema de fachada dupla.

FONTE: adaptado de DOEBBER E MCCLINTOCK, 2006.

Neste artigo, os autores frisam que o processo de planejamento da fachada dupla é um processo que demanda idas e voltas. Caracteriza-se como um processo de otimização de um sistema. Primeiramente deve-se modelar um caso base e verificar seu comportamento. Em seguida, os parâmetros da fachada são alterados, configurando outros modelos que são novamente analisados e comparados com o caso base, até se chegar à composição que apresenta o melhor desempenho. Esta alteração de parâmetros se dá em nível macro (características da construção da fachada) e micro (características dos componentes da fachada).

Segundo os autores, o programa de simulação ideal para análise de fachadas duplas deve incluir a capacidade de modelar os seguintes aspectos:

- A interação das propriedades óticas e térmicas de vidros e dispositivos de sombreamento.
- Considerar dados climáticos anuais, de dias de projeto ou condições climáticas estáveis.
- A ventilação natural ou mecânica da cavidade e as características do fluxo de ar associado.
- As condições do espaço adjacente ao perímetro da fachada (temperatura, cargas de condicionamento térmico e conforto).
- Qualquer configuração dos dispositivos de sombreamento operáveis ou fixos.
- Penetração da luz natural e redução do uso de iluminação elétrica associadas.
- Períodos de utilização ou mecanismos de controle para as aberturas da cavidade, dispositivos de sombreamento e janelas internas operáveis.
- O efeito de ponte térmica através dos montantes das esquadrias e fechamentos.

Estes itens serão levados em consideração para a escolha do programa de simulação a ser utilizado por esta pesquisa.

3.2 Abordagens de simulação para as fachadas duplas ventiladas

As simulações aplicadas para análise do comportamento dos sistemas de fachadas duplas fornecem subsídios para as decisões de projeto e de estratégias de condicionamento (POIRAZIS, 2004).

Fundamental para a previsão do desempenho do sistema é o estudo do comportamento físico do interior da cavidade. Este é influenciado, além da configuração do espaço intermediário, pelas temperaturas do ambiente externo, velocidade e direção dos ventos, radiação solar transmitida e absorvida e ângulos de incidência desta radiação. Estes elementos interagem entre si e influenciam o fluxo do ar no seu interior e a temperatura resultante nas diferentes alturas da cavidade. Portanto, segundo Poirazis (2004), a modelagem e simulação da cavidade nas fachadas duplas ventiladas são tarefas complexas. Os estudos já realizados focam em quatro aspectos principais: simulação do fluxo do ar, cálculo da temperatura em diferentes alturas da cavidade, desempenho energético e simulações da luz do dia, fazendo uso de ferramentas como softwares de simulação, maquetes ou monitoramento de construções existentes.

Atualmente, os programas de simulação para edifícios e os modelos matemáticos desenvolvidos variam em uma ampla gama de complexidade. O modelo mais simples é descrito por algumas equações, e o mais complexo são os modelos CFD (dinâmica computacional dos fluidos), programados para resolver as equações de conservação de massa, *momentum* e energia térmica (POIRAZIS, 2006).

Hensen (2002) classifica as abordagens para simulação de edifícios em dimensões macroscópica e microscópica. Segundo o autor, as abordagens macroscópicas permitem analisar todos os sistemas do edifício e as condições climáticas internas e externas em períodos determinados. As abordagens microscópicas, por outro lado, atingem um nível de detalhe maior, sendo usadas para espaços ou elementos limitados, assim como períodos de tempo menores. Os programas de simulação para edifícios e os modelos de rede normalmente relacionam-se com as abordagens macroscópicas, enquanto os modelos CFD utilizam a técnica microscópica, e geralmente são restritos a condições estáveis. A abordagem macroscópica é mais apropriada para as considerações em séries temporais.

Poirazis (2006) categoriza a modelagem do fluxo do ar da cavidade conforme o nível de resolução e de complexidade, conforme descrito abaixo:

- Balanço energético do edifício ou *building energy balance* (BEB): modelos que dependem basicamente de valores estimados do fluxo de ar.
- Rede de fluxo do ar por zonas ou *Zonal airflow network* (AFN): modelos de abordagem macroscópica que se baseiam no balanço de massas nas zonas e as relações de pressão do fluxo do ar entre zonas, tipicamente para um edifício inteiro.
- CFD: é uma simulação numérica de escoamentos (fluxo de fluidos). Baseia-se em leis de conservação de energia, massa e de momento em todas as minúsculas células que compõem o domínio do fluxo, tipicamente utilizado para uma única zona do edifício.

Um exemplo de simulação por balanço energético do edifício já foi apresentado, na descrição do estudo de Todorovic e Maric (2001).

Segundo Hensen *et al.* (2002), nos modelos de CFD, as equações de conservação são resolvidas para todos os nós de uma rede microscópica de duas ou três dimensões dentro ou ao redor do objeto sob investigação. Em teoria, a abordagem CFD é aplicável a qualquer fenômeno termo fluido. No entanto, na prática, o uso de CFD para simulações aplicadas a edifícios é problemática, pelo poder computacional necessário, pela natureza dos campos dos fluxos do ar e pela dificuldade em avaliar as condições de conforto dos ocupantes resultantes. As aplicações de CFD, portanto, acabam ficando restritas a simulações em casos de estados estacionários ou de períodos muito curtos. Outra limitação do seu uso é a exigência de conhecimentos avançados por parte do pesquisador para realizar as simulações.

Já no método de rede ou *airflow network*, o edifício, seus sistemas de HVAC e fluxos de ar são tratados como uma rede de nós que representam os ambientes, zonas e componentes do sistema, com ligações internodais que representam a distribuição dos caminhos dos fluxos associados a janelas e portas, tubos, bombas, dutos, ventiladores, entre outros. Nestes modelos, supõe-se que para cada tipo de conexão existe uma relação clara entre o fluxo através do componente e a diferença de pressão através dele. As equações do método são não-lineares e simultâneas, que podem ser integradas ao longo do tempo para caracterizar o domínio do fluxo. Os estudos de Saelens (2002, 2003) utilizam deste método para análise de fachadas duplas. A abordagem por rede ainda enfatiza os três processos físicos dominantes na

previsão do comportamento deste sistema de fachadas: os elementos óticos, transferência de calor e fluxo do ar.

De acordo com Poirazis (2006), o método CFD compreende mais tarefas que a modelagem por rede. No entanto, alguns dos elementos avaliados pela técnica são muito sofisticados ou mesmo desnecessários para o estágio de projeto. Devido à problemática apresentada, o método por rede ou *airflow network* se apresenta mais adequado para simulação de fachadas duplas considerando as questões de desempenho e conforto ao longo de um ano inteiro.

Alguns programas de simulação permitem acoplagem de modelos diferentes. Desta forma, no mesmo programa, é possível realizar a simulação de carga térmica e análise do desempenho energético de edificações e seus sistemas, com recursos de modelagem por rede. O *EnergyPlus* é um destes programas, e será descrito em maior profundidade na sequência.

3.2.1 Programa de simulação integrada *EnergyPlus*

As técnicas de simulações computacionais permitem a modelagem de edificações na fase de projeto, a fim de permitir a investigação e comparação de alternativas com objetivo de obter melhor desempenho energético, conforto, entre outros.

O *EnergyPlus* é um programa de simulação integrada criado a partir dos recursos dos programas BLAST e DOE-2, e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este foi desenvolvido para simulação de carga térmica e análise do desempenho energético de edificações e de seus sistemas. O programa envolve a simulação da climatização (resfriamento, aquecimento e ventilação), iluminação, cargas internas, propriedades térmicas de materiais, e outros elementos que participam das trocas térmicas. O *EnergyPlus* utiliza do método do balanço térmico, como recomendado pela norma internacional ASHRAE, para cálculo e análises energéticas em múltiplas zonas, considerando intervalos de tempo de 15 minutos ou até menos, contendo um código aberto para inclusão de novos módulos (CARLO, 2008). Um destes módulos incorporados é um algoritmo para simulação da ventilação natural em ambientes internos em conjunto com a análise térmica, denominado de *AirflowNetwork*. Este módulo corresponde ao método de análise por rede, como apresentado no capítulo anterior.

No *EnergyPlus*, inicialmente, são inseridos a geometria e os componentes construtivos do modelo. A modelagem da geometria é feita por coordenadas cartesianas. Os

componentes construtivos são tratados como camadas, constituídos pelos materiais que também devem ser inseridos no programa. Informações necessárias para o cálculo do fluxo de ar, como volume dos ambientes, altura neutra das zonas, a orientação e localização das superfícies da edificação que contém frestas ou aberturas, são automaticamente extraídas da descrição da edificação para a modelagem térmica. O módulo *AirflowNetwork* calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior, através de frestas e janelas, utilizando como parâmetros os *links* (caminhos) da ventilação programada, as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação. O algoritmo permite que sejam criadas *schedules* de controle, de disponibilidade de ventilação, entre outras. O programa, ainda, possibilita o cálculo automático dos coeficientes de pressão do vento sobre a edificação (MELO *et al.*,2008).

O método de simulação da ventilação natural utilizado pelo programa foi validado, através de medições experimentais de dados, pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge e pelo Centro de Energia Solar da Flórida, ambos nos Estados Unidos. Para as medições, foram selecionadas diferentes edificações. Estas foram modeladas no programa para validar parâmetros específicos relacionados com o módulo de ventilação natural do *EnergyPlus*. Analisando os resultados simulados, observou-se que estes estavam de acordo com os dados das medições realizadas, podendo afirmar que o método da ventilação natural inserido no programa *EnergyPlus* é coerente (MELO *et al.*,2008).

Segundo Doebber e McClintock (2006) , o *EnergyPlus* é capaz de modelar fachadas duplas ventiladas. Para a ventilação mecânica da cavidade, um recurso do permite ao usuário especificar o fluxo de ar através da cavidade, bem como a fonte de entrada e escape do fluxo de ar. Para a ventilação natural, a cavidade ventilada deve ser criada como uma zona separada, e o módulo do programa de fluxo de ar (*AirflowNetwork*) é usado para calcular o empuxo do ar através da cavidade. A vantagem da simulação no *EnergyPlus* é o elevado nível de detalhe que pode ser aplicado ao modelo do edifício e da fachada dupla, que pode ser modelada em conjunto com o resto da edificação para compreender a influência do sistema no seu desempenho. A principal desvantagem do programa é a quantidade de esforço necessário para construir o modelo.

O *EnergyPlus* irá, no que se refere a fachadas duplas ventiladas, simular seu desempenho considerando os três processos físicos dominantes do sistema: os elementos ótico, transferência de calor e fluxo do ar. Desta forma, foi considerado adequado para a condução desta pesquisa.

3.2.2 Simulação de fluxos de ar entre zonas no *EnergyPlus*: módulo *AirflowNetwork*

O módulo *AirflowNetwork*, do *EnergyPlus*, possibilita a simulação dos fluxos de ar entre zonas térmicas, induzidas pelo vento e ou por um sistema de distribuição de ar forçado. A partir da modelagem do edifício inserida, o programa cria uma rede de pressão-fluxo do ar, solucionada a cada intervalo de tempo definido (usualmente 10 ou 15 minutos), através de métodos iterativos. Os fatores influentes considerados pelo programa são: direção e velocidade do vento, dimensões e posicionamento das aberturas, temperaturas do ar externo e das zonas térmicas.

O *AirflowNetwork* pode simular as seguintes condições:

- O fluxo de ar através de aberturas em superfícies exteriores ou entre zonas.
- O fluxo de ar através das fendas ao redor de janelas e portas quando fechadas.
- Ventilação natural (ou seja, o fluxo de ar através de esquadrias abertas ou parcialmente abertas).
- Controle do nível da ventilação natural na zona.
- Controle individual de uma superfície de ventilação natural (porta ou janela).
- Modulação de ventilação natural para evitar grandes oscilações de temperatura do ar da zona.
- Fluxo do ar entre zonas (ou seja, o fluxo de ar através de janelas e portas abertas ou fendas entre zonas).
- Dependência do fluxo de ar dos efeitos chaminé, ventilação cruzada e pressão do vento.
- Dependência da pressão do vento na velocidade do vento, direção do vento e da orientação da superfície.
- Insuflamento e perdas de retorno em um sistema de distribuição de ar.
- Fluxo de ar bidirecional através de grandes aberturas.
- Cálculo dos fluxos de ar e de pressão em dutos ou outros componentes de uma distribuição forçada de ar do sistema.

O módulo *AirflowNetwork* é utilizado tanto para ventilação natural quanto forçada. Para cada zona do edifício, são formados automaticamente dois nós para cálculo da pressão e fluxo do ar, um em seu interior e outra no exterior (podendo este ser o espaço externo ou uma zona adjacente) conectados por aberturas para ventilação configuradas no programa,

denominadas de componentes do fluxo do ar. Entre estes componentes se estabelece uma ligação, que dará o valor do fluxo do ar entre elas.

O módulo do *AirflowNetwork* consiste em três etapas sequenciais:

- Cálculos de pressão e de fluxo do ar.
- Cálculos da temperatura e umidade nos nós da zona e do exterior.
- Cálculos de ganho de calor sensível e latente.

Os primeiros cálculos determinam a pressão em cada nó e o fluxo de ar através cada ligação devido às pressões do vento e correntes de ar forçado. Com base no fluxo de ar calculado para cada ligação, o modelo, então, calcula as temperaturas e taxas de umidade relativa no nó a partir dos índices de determinada zona. Usando estes dados, as cargas sensíveis e latentes do sistema de condução do duto e insuflamento são somadas para cada zona. As cargas sensíveis e latentes obtidas nesta etapa são então utilizadas nas equações de equilíbrio de energia da zona para prever cargas do sistema de HVAC e para calcular as temperaturas, índices de umidade e pressão finais.

O cálculo da ventilação natural, no *EnergyPlus*, é um modelo simplificado de fluxo de ar em comparação com modelos detalhados, tais como os utilizados em modelos de dinâmica de fluidos computacional (CFD). A variável do nó é a pressão e a variável da ligação é a taxa de fluxo de ar.

3.2.3 Validação do EnergyPlus para simulação de fachadas duplas ventiladas

Chan *et al.* (2009) realizaram um estudo de avaliação do desempenho energético de um edifício de escritórios com fachada dupla, nas condições climáticas de Hong Kong²⁰, através de simulações. A pertinência deste artigo, para a presente pesquisa, está no desenvolvimento e execução de um procedimento experimental para verificar o modelo simulado através do *EnergyPlus*.

No modelo computacional do edifício a ser analisado, a cavidade de ar da fachada dupla foi dividida em várias zonas, e cada uma está associada a um nó de rede de fluxo de ar. Os nós da rede foram ligados pelo módulo *AirflowNetwork* no *EnergyPlus*. Com este arranjo,

²⁰ Hong Kong apresenta um clima subtropical, tendendo a quente e úmido, com temperaturas mínimas e máximas entre 16 e 31° C.

os processos de transferência de calor radiante, convecção junto às superfícies, transmissão solar, reflexão e absorção podem ser totalmente modeladas.

O modelo computacional foi verificado por resultados experimentais. Uma célula de teste, equipado com uma fachada dupla, foi construída na cobertura do prédio acadêmico da Universidade da Cidade de Hong Kong, orientação sudoeste. O fechamento interno é um painel de vidro transparente e simples, separando o espaço interno do ambiente externo. O fechamento externo é um painel de vidro absorptivo, com aberturas na base e no topo da cavidade. A ventilação natural ocorre através do ar exterior que entra pela abertura no nível mais baixo, absorvendo o calor no interior da cavidade de ar e, em seguida, escapando pela abertura mais alta. A temperatura interna da célula manteve-se a 22°C , + ou $- 0,5^{\circ}\text{C}$, por meio do uso de ar condicionado.

As variáveis medidas pelo experimento foram as temperaturas das superfícies envidraçadas (interna e externa) da célula de teste, através de *termocouples* (sensores térmicos pontuais), e registradas por um equipamento de *data-logging*. Também se mediu a velocidade do vento e a radiação solar no topo da célula. Estas medições têm o objetivo de estabelecer comparações entre os resultados reais e os oriundos das simulações no *EnergyPlus*, as quais foram feitas para o modelo representativo da mesma célula de teste.

Para validação do modelo, foram realizadas medições no total de seis dias, três dias consecutivos de inverno (dezembro de 2007) e três dias consecutivos de verão (maio de 2008). A figura 3.2 apresenta um dos gráficos comparativos entre os dados medidos e os simulados pelo *EnergyPlus*.

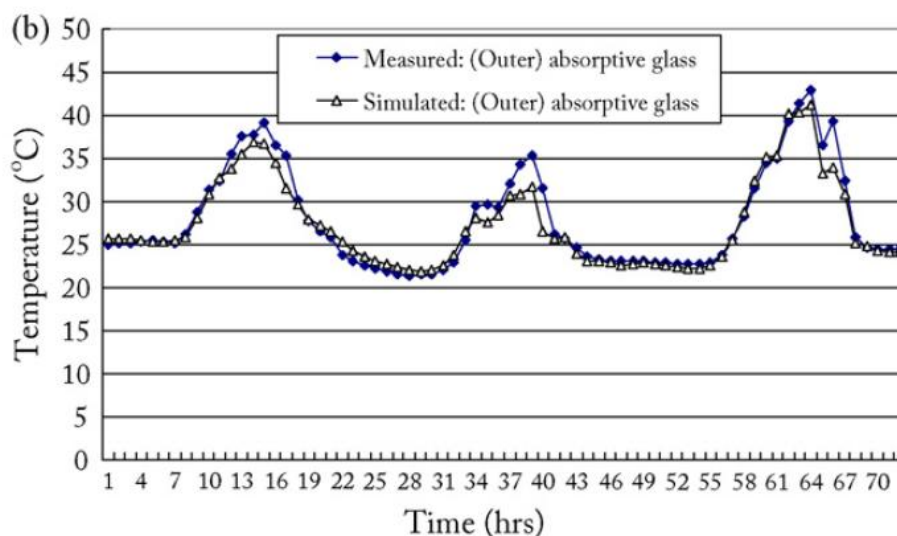


Figura 3.2. Gráfico de comparação entre os dados medidos e simulados para o verão.
FONTE: CHAN *et al* (2009)

Em geral, os resultados mostram que o modelo de simulação computacional no *EnergyPlus* é uma boa representação da situação real e é confiável para prever o desempenho energético da fachada dupla ventilada em edifícios.

3.3 Dados climáticos da cidade de Curitiba

A cidade de Curitiba situa-se na latitude -25.52, longitude -49.18, e altitude ortométrica de 910 m. Para a condição climática brasileira, é considerada uma cidade com clima mais frio, pertencendo à zona bioclimática 1 de acordo com a norma NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2003). De acordo com esta norma, nas estratégias para condicionamento, é citado que, nesta zona bioclimática, será necessário o uso de aquecimento artificial para manter o conforto dos ambientes.

Os dados climáticos horários utilizados neste estudo pertencem ao estudo de Goulart *et al.* (1998). Os registros meteorológicos tratados neste estudo correspondem ao período de 1961 a 1970.

Neste estudo, para as simulações, foram utilizados dois tipos de dados climáticos. O primeiro representa o ano de referência, dos quais resultam os cálculos dos gastos energéticos com condicionamento, temperaturas internas, velocidade dos ventos para ventilação natural, entre outros. O ano de referência utilizado é do tipo TRY (*Test Reference Year*), isto é, compõe-se de uma extensa análise de vários anos reais, com seleção ou eliminação dos meses e temperaturas extremas até resultar no ano de referência. O arquivo do tipo TRY não representa um ano típico, como os denominados de TMY, e sim uma composição de dados climáticos considerados, por esta metodologia, como os mais adequados para representar o clima de uma cidade. Os arquivos do tipo TRY são muito extensos para serem apresentados no corpo do texto da pesquisa, são registrados em arquivos digitais para o uso por programas de simulação.

O segundo tipo de dado climático refere-se às temperaturas de dias típicos de projeto, que são utilizados pelo programa para o dimensionamento do sistema de condicionamento artificial do edifício. Segundo a autora, a definição das temperaturas de dias típicos de projeto segue as seguintes diretrizes:

A ASHRAE apresenta no "Handbook of Fundamentals", cap. 24 [1993], informações de condições climáticas referentes às estações nos Estados Unidos e Canadá e para algumas cidades dos demais países, inclusive para o Brasil. O método

de selecionar temperatura de projeto é baseado na suposição de que o nível de frequência de uma temperatura específica em um determinado período de tempo se repetirá no futuro. As frequências de 1%, 2,5% e 5% foram selecionadas para um intervalo de múltiplos riscos. (...)

A ASHRAE também apresenta informações relativas aos dados de ventos. (...) Para o período de inverno, é encontrada a direção do vento predominante ou seja, a direção que ocorre mais frequentemente com a temperatura de bulbo seco de projeto para o nível 97,5% e a velocidade média do vento (média dos valores de velocidades do vento que ocorrem coincidentemente com a temperatura de projeto) para o mesmo nível. Para o período de verão, é encontrada a direção do vento predominante (direção do vento que ocorre mais frequentemente com a temperatura de bulbo seco de projeto) para o nível de 2,5%. (GOULART *et al.*, 1998)

Para Curitiba, foram utilizados os seguintes dados para os dias típicos de projeto:

DIA DE PROJETO				
	Temperatura máxima de bulbo seco [C]	Amplitude média [C]	Velocidade do vento [m/s]	Direção do vento
CURITIBA_INVERNO	3.1	10.2	0.5	90
CURITIBA_VERÃO	28.6	10.2	3.9	0

Em Curitiba, segundo o programa *AnalisisBio* (LABEEE, 2009), a partir da análise dos dados climáticos da cidade, têm-se as seguintes condições de conforto, considerando as horas de um ano inteiro:

- Conforto: 20% das horas.
- Desconforto: 80% das horas, sendo 73.2% causadas por frio e 6,84% por calor.

A faixa de temperatura da zona de conforto utilizada pelo programa *AnalisisBio* é de 18° a 29° C. Segundo esta análise, portanto, em Curitiba o desconforto por frio é significativo e resulta em uma necessidade por condicionamento artificial para aquecimento maior do que a para resfriamento.

3.4 Critérios para definição das faixas de temperatura para o modo de operação passivo do edifício e temperaturas de conforto

Para a análise do desempenho térmico de edifícios com fachadas duplas ventiladas, como o pretendido pelo estudo, é preciso determinar critérios de avaliação dos resultados. O primeiro critério determina que o edifício estará apto para operar no modo passivo (isto é, sem condicionamento artificial e com ventilação natural) ao apresentar, internamente ao ambiente

analisado, a faixa de temperaturas entre 18°C e 26°C. Este critério é baseado no Regulamento de avaliação da conformidade do nível de eficiência energética para edifícios comerciais, de serviços e públicos (BRASIL-a, 2009), para as simulações de edifícios ou ambientes naturalmente ventilados. Desta forma, fora desta faixa, o edifício estará operando com condicionamento artificial, sem o uso da estratégia de ventilação natural para climatização.

A análise apresentada por este estudo não aprofunda as questões sobre o conforto térmico em ambientes de trabalho, voltando-se principalmente para as questões de desempenho do envoltório. No entanto, duas reflexões sobre a determinação de uma faixa de temperaturas internas aceitáveis, pelas quais é possível fazer uma avaliação parcial das condições de conforto nos ambientes analisados, são apresentadas na sequência.

Lamberts *et al.* (2004) apresentam uma faixa de temperaturas de bulbo seco, para a zona de conforto, de 18 a 29° C e de umidade relativa do ar, entre 20 e 80%. Esta sistematização baseia-se em Givoni (1992), e compõe a carta bioclimática das cidades avaliadas pela NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2003). Esta metodologia abrange uma amplitude grande de temperaturas.

Outra metodologia, levantada pela revisão bibliográfica, é o método específico da ASHRAE 55, de 2004, para edifícios naturalmente ventilados, onde os ocupantes exercem atividades sedentárias e têm controle sobre as condições ambientais, como a abertura de janelas, e flexibilidade quanto à vestimenta (MARCONDES, 2010). Este método representa um modelo adaptativo de conforto, considerando uma relação entre as temperaturas médias do ar de bulbo seco e operativa. A temperatura operativa é uma média ponderada da temperatura de bulbo seco e da radiante (originada pelas superfícies do ambiente).

Pelo método da ASHRAE 55, as temperaturas operativas aceitáveis relacionam-se com a média das temperaturas externas de cada mês, e devem respeitar uma faixa de ocupantes satisfeitos com o ambiente entre 80% e 90%.

Os limites de temperaturas confortáveis são definidos a partir do cálculo da temperatura operativa neutra, podendo variar entre +3,5° C (para a temperatura máxima) e -3,5° C (para a temperatura mínima), para a faixa de 80% de ocupantes satisfeitos. A temperatura operativa neutra é dada por:

$$\text{Temperatura operativa neutra} = 17,8 + 0,32 * \text{média da temperatura mensal externa}$$

Para Curitiba, a partir da base de dados climáticos utilizada, as faixas de temperaturas operativas consideradas confortáveis estão definidas na tabela abaixo:

MÊS	MÉDIA DA TEMPERATURA EXTERIOR [°C]	TEMPERATURA MÍNIMA [°C]	TEMPERATURA NEUTRA [°C]	TEMPERATURA MÁXIMA [°C]
JANEIRO	20.6	20.9	24.4	27.9
FEVEREIRO	20.7	20.9	24.4	27.9
MARÇO	19.6	20.6	24.1	27.6
ABRIL	16.3	19.5	23.0	26.5
MAIO	14.6	19.0	22.5	26.0
JUNHO	13.1	18.5	22.0	25.5
JULHO	12.5	18.3	21.8	25.3
AGOSTO	13.6	18.7	22.2	25.7
SETEMBRO	15.3	19.2	22.7	26.2
OUTUBRO	14.2	18.8	22.3	25.8
NOVEMBRO	18.0	20.1	23.6	27.1
DEZEMBRO	17.8	20.0	23.5	27.0

Tabela 3-1 - Temperaturas operativas aceitáveis calculadas para Curitiba.

Como visto, os dois critérios os dois critérios não são coincidentes. Como as questões relativas ao conforto térmico (temperaturas, umidade relativa, velocidade do ar no interior) não foram abordadas em profundidade, o primeiro critério (faixa de temperaturas para a operação passiva do edifício) foi considerado o principal para a análise dos resultados das simulações, quando o condicionamento artificial não estiver em uso.

4. SUMÁRIO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fachada dupla ventilada é um sistema que consiste de duas peles instaladas de forma a permitir o fluxo do ar na cavidade intermediária. O movimento do ar no espaço intermediário entre as peles alteram e dominam as características do desempenho do envoltório, conferindo ao sistema a característica de responder dinamicamente à variação das condições ambientais do local de um edifício. O sistema ainda pode incorporar dispositivos de sombreamento integrados, ventilação natural e estratégias de isolamento térmico.

O uso das fachadas duplas ventiladas tornou-se uma tendência da arquitetura corporativa a partir dos anos 1990, principalmente na Europa, impulsionada, por um lado, pelo desejo de envoltórias fartamente envidraçadas, e por outro pelo comprometimento dos profissionais com projetos que demonstrassem preocupação com o meio ambiente e a demanda por edifícios mais sustentáveis.

As fachadas duplas ventiladas são associadas a várias vantagens potenciais, que justificam sua escolha como envoltório de edifícios. São algumas vantagens levantadas junto à literatura científica:

- Maior uso da ventilação natural para os ambientes, mesmo em situações sujeitas a fortes ventos.
- Maior isolamento térmico do envoltório, especialmente para o período em que se necessita aquecimento para os ambientes.
- Uso de ventilação noturna natural com segurança patrimonial e contra intempéries.
- Controle solar, promovido pela colocação de dispositivos de sombreamento móveis e pela diminuição da radiação solar direta que entra nos ambientes.
- Proteção dos dispositivos de sombreamento pela colocação dos mesmos no interior da cavidade.
- Maior isolamento acústico.
- Possibilidade de controle individual das condições de conforto ambiental pela movimentação intencional de dispositivos de sombreamento e abertura de janelas para ventilação natural dos ambientes.
- Maior aproveitamento da iluminação natural.

- Redução do consumo de energia para condicionamento e redução dos impactos ambientais relacionados a operação do edifício.
- Estética e permeabilidade visual, relacionadas à maior leveza e transparência dos fechamentos, proporcionadas pelo envidraçamento da fachada.

As fachadas duplas ventiladas podem assumir diferentes conceitos de funcionamento, de ventilação e configurações construtivas. Três critérios independentes para classificação das FDV são destacados pela literatura: tipo de ventilação da cavidade, compartimentação da fachada e modo de ventilação da cavidade. A combinação dos aspectos destacados por estas classificações configuram as tipologias das FDV, e seu entendimento é fundamental para a previsão do comportamento do sistema.

A ventilação da cavidade pode ser natural, mecânica ou híbrida. Quanto à compartimentação da fachada, as FDV podem ser:

- *Multi-storey façade* ou fachada de múltiplos pavimentos.
- *Corridor façade* ou fachada corredor.
- *Box-window façade* ou janela-caixa.
- *Shaft-box façade*, que resulta da combinação da fachada de múltiplos pavimentos e fachada corredor.
- *Multi-storey louver façade*, cuja característica principal é permitir a abertura total da pele externa em dias de muito calor.

Para o uso da estratégia de ventilação natural para os ambientes, as tipologias mais indicadas são a *box-window*, *corridor façade* e a *multi-storey louver façade*.

O terceiro critério de classificação diz respeito ao modo de ventilação da cavidade utilizado, isto é, se refere à origem e destino do ar que circula na cavidade. Neste caso, duas classificações são apresentadas: a de Lang e Herzog (2000) e do BBRI (2004). Para o uso da ventilação natural para os ambientes, a tipologia empregada é a *twin face* ou sistema de face dupla.

Estudos através de simulações para diferentes configurações, resultantes da alteração dos parâmetros dados pelas classificações das FDV, podem fornecer uma melhor compreensão do desempenho do sistema. Isto é, se o *designer* da fachada é capaz de entender o funcionamento e a flexibilidade do sistema, considerando os requisitos prioritários para a edificação e seus ocupantes, será possível otimizar o desempenho da mesma e determinar os

detalhes técnicos com relação aos parâmetros de projeto a fim de cumprir os objetivos pretendidos. Diferentes combinações dentro dos critérios de classificação podem levar a soluções de sistemas distintas. Portanto, é fundamental focar nos objetivos principais que devem ser obtidos, assim como nos elementos principais que influenciam o desempenho desejado, a fim de fazer previsões mais seguras.

O comportamento da fachada dupla é complexo, dominado por três processos físicos principais que interagem e influenciam as condições de conforto e de temperaturas obtidas no interior do edifício: o fluxo do ar, a transferência de calor através dos fechamentos e o elemento ótico, relacionado à transmissão solar associada ao uso de fechamentos largamente envidraçados e dispositivos solares. Estes processos resultarão em diferentes cenários conforme a composição dos parâmetros construtivos da cavidade, incluindo suas dimensões, tipo de vidro utilizado, tipo de ventilação, orientação do edifício, entre outros.

De acordo com a revisão bibliográfica, a profundidade da cavidade mais adequada para uso da ventilação natural dos ambientes está entre 60 e 80 centímetros, com proporção das aberturas da pele externa correspondentes a 15% do fechamento. Foi observado também que a configuração do edifício deve permitir o uso da estratégia de ventilação cruzada.

Quanto à composição das peles das FDV, considerando a configuração dos fechamentos envidraçados, os melhores desempenhos estão associados a colocação de vidro simples internamente e duplo externamente, ou duplo internamente e duplo externamente, com até 26% de redução anual no consumo de energia para resfriamento. Por motivos econômicos, o uso de vidro simples e duplo se mostra mais adequado. Os tipos de vidro recomendados são, para a pele interna, o transparente, e com propriedades reflexivas na pele dupla exterior.

A influência do vento pode ser preponderante para a qualidade da ventilação natural dos ambientes. A situação mais favorável é a sota-vento, por criar condições de pressão negativa no interior da cavidade que favorecem o fluxo do ar através dos ambientes na direção correta. Para otimizar o aproveitamento desta estratégia, é recomendado elevar o topo da cavidade além da altura do edifício e prever aberturas móveis nas duas faces desta elevação. Conforme a direção do vento, uma ou outra deve permanecer aberta para criar o efeito desejado para propiciar o movimento do ar corretamente. No caso da ausência de vento, o fluxo do ar passa a ser dominado pelo efeito chaminé na cavidade. Neste caso, a influência

da radiação solar agindo sobre o ar no espaço intermediário é fundamental para que a convecção aconteça adequadamente.

O posicionamento dos dispositivos de sombreamento no interior da cavidade influencia mais o desempenho da fachada que a cor ou material utilizado. A posição recomendada é entre a porção central da cavidade e a pele exterior, da qual devem estar afastados no mínimo 15 centímetros. O correto planejamento da colocação dos dispositivos de sombreamento pode resultar em até 25% de redução de consumo de energia para condicionamento.

Para prever o comportamento da FDV e projetá-la corretamente, é preciso considerar dois tipos de diretrizes. A primeira delas são os limitantes de projeto, relacionados com o clima do local, a implantação e o uso do edifício. O segundo tipo refere-se aos parâmetros de projeto sobre os quais o projetista deve tomar decisões, como a tipologia da fachada, a geometria da cavidade, escolha dos materiais, dimensionamento das aberturas para ventilação natural, entre outros.

O processo de planejamento da fachada dupla é um processo de otimização de um sistema. Primeiramente deve-se modelar um caso base e verificar seu comportamento. Em seguida, os parâmetros da fachada são alterados, configurando outros modelos que são novamente analisados e comparados com o caso base, até se chegar à composição que apresenta o desempenho mais adequado de acordo com os requisitos pretendidos. Fundamental para a previsão do desempenho do sistema é o estudo do comportamento físico do interior da cavidade. Isto pode ser obtido através de análises com uso de simulações. Os modelos de simulação para determinação do fluxo do ar da cavidade são de três tipos: balanço energético do edifício, rede de fluxo do ar por zonas e CFD.

O modelo de rede ou *airflow network*, por permitir uma abordagem macroscópica do edifício e dos seus sistemas ao longo de períodos mais longos, se mostra mais adequado para a análise da influência das FDV no desempenho térmico e energético em edifícios, como pretendida por este estudo. Alguns programas de simulação permitem acoplagem de modelos diferentes. Desta forma, no mesmo programa, é possível realizar a simulação de carga térmica e análise do desempenho energético de edificações e seus sistemas, com recursos de modelagem por rede.

A revisão bibliográfica estabeleceu parâmetros para a escolha do programa de simulação a ser utilizado para a estratégia de coleta de dados. Dentro das opções disponíveis,

escolheu-se o programa *EnergyPlus*. Este foi utilizado em artigos científicos pesquisados para previsão do comportamento das FDV, apresenta recursos para cálculo dos processos de transmissão de calor, do fluxo do ar, de transmissão solar, reflexão e absorção. Como dados de saída, o programa fornece as temperaturas internas dos ambientes e das superfícies dos fechamentos, assim como o consumo de energia elétrica usada para condicionamento térmico. O *EnergyPlus* já foi validado para análise de fachadas duplas ventiladas.

5. DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

5.1 Unidade de análise

Nesta pesquisa, a unidade de análise é o sistema construtivo fachada dupla ventilada ou *double-skin façade*.

5.1.1 Caracterização do modelo de FDV a ser estudado

As fachadas duplas ventiladas, como apontado na revisão bibliográfica, podem assumir várias configurações com diferentes objetivos de aplicação a edifícios. Para o estudo, foi selecionado o modelo *corridor façade*, com ventilação natural da cavidade. Esta seleção se justifica por permitir o melhor uso de ventilação natural para os ambientes internos e evitar a propagação de fogo, som e agentes poluentes entre pavimentos.

5.2 Delimitação da pesquisa

O objeto de estudo desta pesquisa são os sistemas de fachadas duplas ventiladas aplicadas em edifícios comerciais ou institucionais. Esta tipologia de uso foi definida pela importância das edificações usadas para o trabalho para as cidades, e pela ocorrência de estudos internacionais que enfocam justamente a aplicação do sistema a este uso específico.

O contexto desta pesquisa é a cidade de Curitiba, e as conclusões do trabalho não necessariamente se aplicam a outras localidades. O comportamento do sistema é dependente das condições climáticas e da inserção urbana dos edifícios estudados, portanto generalizações estarão sujeitas a erros significativos.

Outra delimitação importante diz respeito ao método de pesquisa através de simulações computacionais. A simulação, neste caso, é uma imagem virtual de fenômenos físicos reais e uma simplificação da realidade feita através de modelos. Este método permite reproduzir ou imitar certos aspectos de modo mais ou menos aproximado e controlado, a partir da inserção de dados climáticos que descrevem as condições de um determinado ano representativo, com o objetivo de prever o comportamento do edifício sob os parâmetros aplicados e permitir a otimização do sistema. O levantamento de dados reais do desempenho

dos edifícios, com o uso de fachadas duplas ventiladas, necessita que os modelos propostos sejam construídos e monitorados.

Os gastos energéticos operacionais referentes à iluminação artificial, ao uso de equipamentos e do funcionamento dos sistemas de HVAC, entre outros, não serão apresentados como resultados por este estudo. Outros fatores físicos definidores do conforto térmico, como umidade do ar, não serão considerados de forma prioritária.

5.3 Caracterização do problema

A estrutura da pesquisa relaciona-se com o problema a qual esta pretende estudar, podendo ser de natureza fixa ou flexível. A estrutura fixa é utilizada quando a teoria sobre o assunto está em estágio desenvolvido, as variáveis envolvidas são conhecidas e também os procedimentos que serão seguidos para se chegar ao resultado esperado, como no caso deste estudo. Os procedimentos são frequentemente experimentais, e se busca primeiramente confirmar uma teoria já existente (ROBSON, 2002).

Ainda segundo Robson (2002), as pesquisas podem ser classificadas também conforme o objetivo que se pretende alcançar, em exploratória, descritiva, explicativa e emancipatória. A pesquisa explicativa tem como objetivo identificar fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos, portanto é denominação mais adequada para este estudo.

O problema apresentado pela presente pesquisa foi abordado em dois momentos, o primeiro descritivo (composto pela revisão bibliográfica) e o segundo explicativo. A revisão da bibliografia busca identificar e descrever as principais características do sistema de fachadas duplas ventiladas e sua utilização em edifícios de escritórios, casos onde a técnica foi utilizada, modelos de análise e resultados esperados pela sua aplicação. No segundo momento, o estudo explicativo procura analisar a influência do uso do sistema no desempenho de edifícios, através do método simulação em casos selecionados.

5.4 Seleção das técnicas de pesquisa

A escolha das técnicas de pesquisa guia os procedimentos necessários para a coleta de informações, análise destes dados e demonstração da confiabilidade e validade das descobertas (ROBSON, 2002).

Para obter os dados de análise referentes aos objetivos e à hipótese de trabalho, foram realizadas simulações computacionais aplicadas a modelos pré-determinados. Foram definidos dois modelos principais para realização das simulações, denominados de **modelo A** e **modelo B**. O modelo A representa uma unidade de escritório de um edifício comercial de Curitiba, configurado a partir de pesquisa junto ao mercado imobiliário. As simulações do modelo A, de natureza mais simples, objetivaram o maior entendimento da influência do uso das FDV em edifícios em Curitiba, e também a otimização de alguns parâmetros do sistema para uso na etapa seguinte. Já o modelo B representa um edifício real, selecionado para aplicação da estratégia de *retrofitting* de fachada.

As técnicas selecionadas para este estudo foram desenvolvidas em duas etapas principais e duas etapas secundárias, de acordo com a sistematização a seguir:

- 1ª Etapa - Revisão bibliográfica.
- 2ª Etapa - Simulações:
 - Simulações do Modelo A.
 - Simulações do Modelo B.

Estes procedimentos foram desenvolvidos desta forma a fim de atingir os objetivos do estudo. No próximo item, serão detalhadas as técnicas de coleta de dados que serão utilizadas em cada uma das etapas do estudo.

5.5 Técnicas de coleta de dados

Foram definidas, portanto, duas técnicas para coleta de dados para a pesquisa: revisão bibliográfica e simulação.

5.5.1 Revisão bibliográfica

É definida por Gil (1995) como o levantamento de informações feito a partir de material já publicado, constituído principalmente por livros e artigos científicos. Essa técnica será utilizada pelo **método bibliográfico**.

5.5.2 Simulação

Para estabelecer medidas da influência do uso do sistema das FDV em edifícios quanto a conforto e desempenho energético, foram realizadas simulações computacionais de

ano inteiro aplicadas a modelos virtuais pré-determinados. Como base teórica para estas simulações, buscou-se a referência de artigos técnicos selecionados e apresentados na revisão bibliográfica.

A simulação, aplicada a edificações, trabalha com modelos matemáticos o suficientemente detalhados para previsão de alguns aspectos do desempenho de um edifício e seus sistemas. Segundo Carlo (2008), as simulações são usadas para comparar um projeto a outro projeto de referência, para comparar alternativas de projeto ou para comparar a operação esperada em uma edificação com a operação real desta. A simulação, ainda, lida com interações complexas considerando condições diversas, a fim de prever cargas térmicas, condições do ambiente interno como temperatura e umidade, consumo de energia e dimensionando equipamentos do sistema de condicionamento de ar.

A simulação, portanto, permite reproduzir ou imitar certos aspectos de modo mais ou menos aproximado e controlado (MANZ, *et al.*, 2005). No presente estudo, a simulação é integrada, englobando dados sobre os fluxos de calor da edificação, interação com o ambiente externo nas quatro estações do ano e desempenho dos equipamentos ao longo do tempo. Os principais resultados obtidos são: temperaturas do ambiente, a serem relacionadas com parâmetros de conforto, e consumo de energia elétrica, relacionada com parâmetros de desempenho energético.

O procedimento de simulação, para cada situação, considerou a modelagem do edifício com fachada simples e convencional como o modelo base, e o mesmo, com a adição da FDV, como o modelo proposto.

É importante observar que os edifícios, escolhidos como casos para simulação, podem em sua situação atual apresentar condições de ocupação fora de conforto. Neste cenário, estes casos foram simulados também com acréscimo de condicionamento artificial para atingir condições de conforto, e fornecer os resultados de consumo de energia para realização da comparação com os modelos propostos.

Para simular o desempenho energético de um sistema de fachadas duplas, é necessário modelar, além da geometria, materiais do edifício, sua orientação e cargas térmicas, o fluxo de ar na cavidade. Para tanto, o programa escolhido é o *Energy Plus*, como justificado na revisão bibliográfica. Os dados climáticos utilizados para as simulações representam um ano de referência, do tipo TRY (*Test Reference Year*). Apesar de representar uma limitação da pesquisa, esta incerteza sobre a correspondência dos dados climáticos

sistematizados com as condições climáticas reais, as conclusões qualitativas do estudo podem ser consideradas válidas, por comparar modelos com diferentes tratamentos sob as mesmas condições.

5.6 Protocolo de coleta de dados

5.6.1 Critérios para seleção das amostras

Segundo Robson, as amostras se caracterizam por probabilísticas, quando há critérios estatísticos na seleção das mesmas, ou não-probabilísticas. Para este estudo, serão selecionadas amostras não-probabilísticas por **finalidade**, ou seja, escolhidas pelo julgamento da sua tipologia ou interesse para a pesquisa. Estas devem atender às necessidades específicas do projeto.

A seguir, serão detalhados os critérios que serão utilizados para essas seleções.

5.6.1.1 Amostra para o levantamento e estudo de caso

As amostras foram selecionadas a partir de observação direta e disponibilidade de acesso e de material físico (projeto arquitetônico, de instalações, fotos, entre outros) para consulta.

Além disso, a amostra possui algumas características compatíveis com os objetivos e procedimentos da pesquisa:

- a) Ser da tipologia definida (edifício de escritórios ou institucional).
- b) Qualificar-se para a estratégia de *retrofitting*, no caso do modelo B, por tempo de uso, necessidade de renovação da fachada, condições de conforto ambiental ou desempenho inadequados.
- c) Permitir, no caso do modelo B, acesso ao edifício, seus ocupantes e/ou aos registros do projeto de arquitetura.

5.6.2 Etapas da coleta de dados

A coleta de dados será dividida em duas etapas principais, a revisão bibliográfica (já apresentada nos capítulos 2 e 3) e as simulações. A figura a seguir representa o esquema geral de coleta de dados da pesquisa.

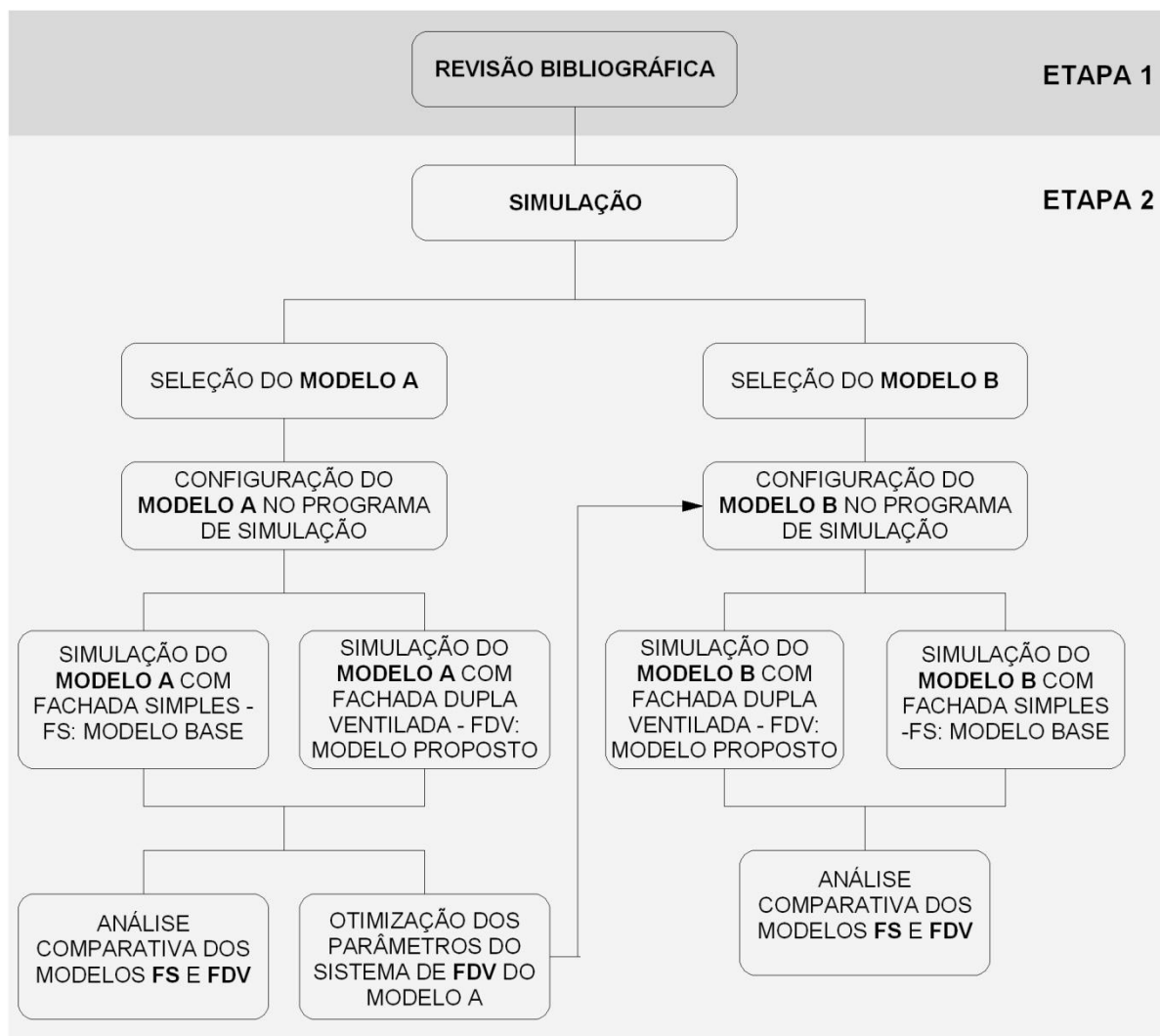


Figura 5.1. Estrutura geral da coleta de dados.

5.6.2.1 2ª Etapa: Simulação

A etapa de simulação foi planejada como um projeto de experimentos. O projeto de experimentos é utilizado para otimização de sistemas, sejam serviços, produtos ou processos. Um sistema é avaliado por indicadores de desempenho, isto é, características de qualidade resultantes da operação do mesmo (RIBEIRO, *et al.*, 2000).

Em um sistema, existem parâmetros que podem ser alterados durante sua execução e afetar as características de qualidade resultantes. O projeto de experimentos se compõe dos seguintes elementos (RIBEIRO, *et al.*, 2000):

- Características de qualidade: são as qualidades pretendidas e percebidas como importantes. No caso deste estudo, são representadas pelo objetivo e hipóteses de trabalho.

- Variáveis de resposta: aspectos do produto que podem ser medidos e permitem quantificar as características de qualidade. Neste estudo, são representadas pelos resultados (saídas) buscados das simulações, ou seja, as temperaturas internas E o consumo de energia elétrica para condicionamento, entre outros.
- Parâmetros do processo: todos os componentes dos objetos estudados que podem ser alterados e que talvez tenham um efeito sobre as variáveis de resposta. São representados no estudo pela configuração física dos modelos base (características construtivas, orientação do edifício, forma da planta, pé-direito, padrões de uso, etc.) e dos modelos propostos (tipo, geometria e dimensões das fachadas duplas, orientação da fachada e materiais escolhidos), uso de ventilação natural e/ou sistemas artificiais de condicionamento.
- Fatores controláveis: representam o subconjunto dos parâmetros do processo que foram escolhidos para serem estudados a vários níveis no experimento. Por exemplo, a alteração do tipo de fachada dupla dos modelos propostos, sua geometria e dimensões, orientação da fachada e materiais escolhidos, além do uso de ventilação natural e/ou sistemas artificiais de condicionamento.
- Fatores constantes: são os parâmetros do processo que se mantêm constantes durante o experimento. São representados no estudo pela configuração física dos modelos base, características construtivas, orientação do edifício, forma da planta, pé-direito, padrões de uso, sistemas de condicionamento, etc.
- Fatores não controláveis: são as variáveis que não podem ser controladas e responsáveis pelo erro experimental. Por se tratar de simulações, este fator terá menor importância no estudo.

A figura a seguir representa a relação entre as características de qualidade e as variáveis de resposta.

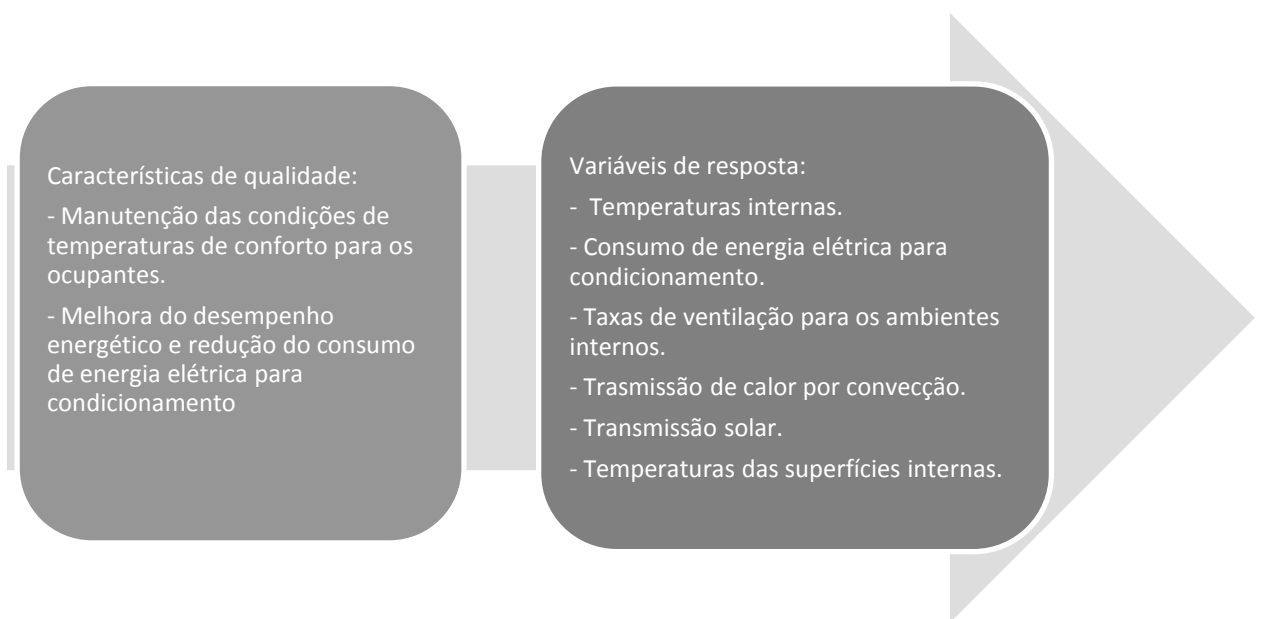


Figura 5.2. Características de qualidade e as variáveis de resposta.

A figura abaixo representa o encadeamento do processo da simulação para chegar às variáveis de resposta. Os fatores controláveis devem ser alterados até o ajuste ótimo do processo, o que demandará a execução de simulações sequenciais com variação destes fatores até obter as variáveis de resposta consideradas como mais adequadas.

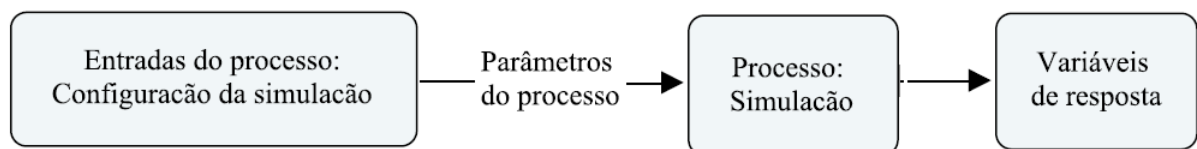


Figura 5.3. Processo da simulação.

Portanto, o primeiro passo do protocolo é a caracterização das demandas qualitativas do estudo, as quais correspondem ao objetivo e às hipóteses da pesquisa. O segundo passo é definir as variáveis de resposta a serem fornecidas pelas simulações, as quais fornecerão os dados para análise dos resultados. Na sequência, são definidos os fatores constantes, que representam a configuração dos modelos base (FIGURA 5.4) ou a situação atual dos edifícios.

Configuração física do modelo base	Contexto	Materiais	Padrões de uso e Cargas internas	Sistemas de condicionamento ambiental
<ul style="list-style-type: none"> •Nº de pavimentos e altura do edifício •Repetição de pavimentos tipos, conformação do embasamento e cobertura •Forma da planta •Pé-direito e forro •Dimensões das aberturas da fachada existente 	<ul style="list-style-type: none"> •Localização do edifício no meio urbano •Orientação do edifício e das fachadas 	<ul style="list-style-type: none"> •Materiais das lajes, pisos, paredes internas e externas existentes •Material do forro existente. •Materiais das esquadrias existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> •Pessoas: ocupação, períodos de ocupação e atividades •Iluminação: período de uso e consumo elétrico •Equipamentos elétricos: período de uso e consumo elétrico 	<ul style="list-style-type: none"> •Uso de ventilação natural. •Tipo do sistema de condicionamento artificial.

Figura 5.4. Fatores constantes dos parâmetros do processo.

E, por fim, são definidos os fatores controláveis dos parâmetros do processo (FIGURA 5.5). Os fatores controláveis representam a aplicação das fachadas duplas ventiladas aos modelos base.

Configuração física do modelo proposto	Contexto	Materiais	Sistemas de condicionamento ambiental
<ul style="list-style-type: none"> •Tipo de fachada dupla •Dimensões da cavidade •Dimensões das aberturas nas peles internas e externas •Dispositivos de sombreamento (localização e tipo) 	<ul style="list-style-type: none"> •Orientação do da fachada dupla 	<ul style="list-style-type: none"> •Materiais dos fechamentos opacos da fachada •Tipo de vidro (simples ou duplo, comum ou seletivo) •Materiais dos dispositivos de sombreamento 	<ul style="list-style-type: none"> •Uso de ventilação natural. •Tipo do sistema de condicionamento artificial.

Figura 5.5. Fatores controláveis dos parâmetros do processo.

As simulações se desenvolverão em duas sub etapas principais, a primeira correspondente aos modelos base, a segunda referente aos modelos propostos. Os dados de entrada no programa de simulação são os citados anteriormente: fatores constantes (modelo base) e fatores controláveis (modelos propostos).

A partir deste ponto, o estudo passa a se referir ao modelo base como FS (fachada simples), e ao modelo proposto com FDV (fachada dupla ventilada). Desta forma, as simulações compreendem dois grandes grupos e duas subdivisões de cada grupo:

- Modelo A: simulações da sala comercial.
 - Modelo A – FS.
 - Modelo A – FDV.

- Modelo B: simulações do edifício real e existente (*retrofitting* da fachada existente).
 - Modelo B – FS.
 - Modelo B – FDV.

Na revisão bibliográfica foi realizado o levantamento de diretrizes e parâmetros de projeto, com definição de valores já analisados por estudos anteriores. Identificaram-se os tipos de fachadas duplas mais adequadas para uso de ventilação natural e a importância da profundidade da cavidade para o desempenho. Estes parâmetros foram considerados neste estudo como de primeiro nível, isto é, fundamentais para a otimização do desempenho do sistema. Serão então usados para o ajuste preliminar do modelo A - FDV.

Os resultados obtidos por estas simulações iniciais (condições de conforto e consumo de energia elétrica para condicionamento) foram analisados, e a configuração escolhida foi a que resultou nos melhores valores de temperaturas internas e consumo de energia elétrica para condicionamento. O modelo, assim ajustado, recebeu o tratamento com os parâmetros de nível superior: orientação da fachada dupla, tipo de vidro para as peles interna e externa e colocação de dispositivos de sombreamento.

A otimização do sistema no modelo A serve de referência para a configuração do modelo B – FDV.

5.6.2.2 Procedimento de simulação no *Energy Plus*

Para as simulações foi utilizado o programa *Energy Plus* versão 5.0.

Os passos seguidos para configuração e simulação dos modelos de edifícios no programa são listados a seguir:

1. Inserção do arquivo climático da cidade de Curitiba na interface do programa.
2. Definição do contexto geográfico do edifício: ângulo de edifício com relação ao eixo norte (azimute), latitude e longitude, altura com relação ao nível do mar.
3. Definição das zonas térmicas do edifício: por coordenadas relativas.
4. Adição dos materiais construtivos do edifício, por exemplo: concreto, alvenaria, vidro.
5. Configuração dos elementos construtivos, por exemplo: parede de alvenaria, laje de concreto, janela de vidro.

6. Adição das superfícies que compõe cada zona térmica, definindo o tipo de superfície e as condições limítrofes de cada uma (exposta ao exterior, a outras zonas ou adiabática). Por coordenadas relativas.
7. Adição das aberturas das superfícies de cada zona: paredes e janelas.
8. Adição de cargas térmicas e rotinas (*schedules*) de funcionamento das cargas térmicas. Foram utilizadas as seguintes cargas térmicas e rotinas de funcionamento nas simulações:
 - a. Iluminação artificial.
 - b. Equipamentos elétricos.
 - c. Ocupação por pessoas e nível de atividade.
 - d. Ventilação natural.
 - e. Sistema de condicionamento artificial: aquecimento e resfriamento.
9. Configuração da ventilação natural dos ambientes e da FDV através do módulo *Airflownetwork* do programa.
10. Configuração do sistema de condicionamento artificial dos ambientes.
11. Definição das variáveis de resposta ou de saída (*outputs*) do programa, como explicado na sequência.

5.6.2.3 Variáveis de resposta no *Energy Plus*

O programa *Energy Plus* permite que sejam determinadas variáveis de resposta (chamados de *outputs*) específicas. Estas variáveis foram selecionadas no programa de acordo com os processos físicos que estão sendo estudados. Cada uma destas relaciona-se com os objetivos e hipóteses desta pesquisa, e sua análise levam à caracterização de qualidade pretendida (manutenção das condições de conforto e melhora no desempenho energético de edifícios de escritórios).

As respostas podem ser obtidas por zonas térmicas, por superfícies e por elementos construtivos (por exemplo janelas ou portas) definidos no modelo simulado.

5.6.2.3.1 Temperaturas externas e internas: variáveis de resposta

- Temperatura externa de bulbo seco [°C].
A temperatura de bulbo seco externa calculada com base na altura acima do solo do centróide da zona.
- Zona - temperatura média do ar [°C]

A temperatura média do ar, por zona, é a temperatura média das temperaturas do ar no *timestep*²¹ do sistema.

- Zona - temperatura média radiante [°C]

A temperatura média radiante (TRM) de um espaço é uma medida do efeito combinado das temperaturas de superfícies dentro desse espaço. Especificamente, é a área da superfície multiplicada pela emissividade média ponderada das temperaturas de superfície da zona interior, onde a emissividade é a absorptividade térmica de cada camada de material dentro de cada superfície.

- Zona - temperatura operacional [°C]

Temperatura Operativa da zona (TO) é a média temperatura média do ar (TMA) e da temperatura média da Radiante (TRM) da zona, portanto:

$$TO = 0,5 * TAM + 0,5 * TRM$$

5.6.2.3.2 Fluxo do ar – ventilação natural: variáveis de resposta

- Volume do fluxo de ar do nó 1 ao 2 [m³/s]

É o volume de saída de ar em m³/s do nó 1 em direção ao nó 2.

Esta variável informa o fluxo de ar da superfície através de uma fenda ou abertura, e através de conexões definidas em um grupo de distribuição de objetos de ligação do programa.. A conexão entre superfícies é dividida em dois tipos: superfície exterior e superfície interior. O nó 1, para uma de superfície conectada com o exterior, representa uma zona térmica, e o nó 2 é um nó externo à zona. Assim, o valor desta variável define a vazão do ar de uma zona térmica em direção ao ar livre. A direção do fluxo através de uma fenda ou abertura interior é definida a partir de uma superfície da zona térmica (nó 1) para uma zona adjacente que contém uma superfície em contato com o ambiente externo (nó 2).

Deve ser salientado que, em geral, cada ligação tem um fluxo direcional em dado momento, quer do nó 1 para 2 ou do nó 2 para 1. No entanto, os componentes de janelas e portas criados podem ter fluxos em ambas as direções simultaneamente.

²¹ Timestep. Significa um valor para uso dentro de uma hora.. Por exemplo, um valor de 6 significa que o programa para usará uma parcela de tempo de 10 minutos e um valor de 60 significa um passo de tempo de 1 minuto.

- Volume do fluxo de ar do nó 2 ao 1 [m^3/s]

É o volume de saída de ar em m^3/s do nó 2 em direção ao nó 1. O fluxo é definido da mesma maneira descrita no item anterior.

- Trocas de ar [ach]

O número de renovações do ar da zona produzida pela ventilação, através da abertura de janelas, portas e outros situados nas superfícies exteriores da zona (ou seja, a soma dos fluxos de ventilação e infiltração a partir do exterior para a zona).

5.6.2.3.3 Transferência de calor: variáveis de resposta

A transferência de calor em um sistema se dá por três maneiras: **condução**, **convecção** e **radiação**. Neste estudo, serão abordadas as variáveis relacionadas à convecção e à transmissão solar. Devido a presença de grandes áreas envidraçadas no sistema de FDV, a condução relacionada a este tipo de material não foi considerada.

- Zona – taxa de convecção das superfícies [W]

É a soma, em watts, do calor transferido para o ar da zona a partir de todas as superfícies.

- Superfície – ganho de calor por convecção [J]

O calor transferido da face interna da superfície para o ar de zona.

- Temperatura interna da superfície [C]

É a temperatura interna da superfície de uma superfície de transferência de calor.

5.6.3 Elementos óticos – transmissão solar: variáveis de resposta

- Zona – transmissão solar direta de janelas externas [W]

A soma da transmissão solar direta de todas as janelas externas da zona.

- Zona – transmissão solar direta de janelas internas [W]

A soma da transmissão solar direta de todas as janelas internas da zona.

- Zona – transmissão solar difusa de janelas externas [W]

Combina a ação da radiação solar direta e difusa. A difusa é a transmitida por uma janela exterior, cuja origem é a radiação solar difusa incidente no exterior da janela.

- Zona – transmissão solar difusa de janelas interiores [W]

A soma da transmissão solar difusa de janelas (ver definição acima) de todas as janelas do interior de uma zona.

5.6.3.1.1 Taxas de refrigeração e aquecimento: variáveis de resposta

- Zona - Taxa de aquecimento sensível [W]

Este campo representa a taxa de aquecimento sensível em Watts.

- Zona - Taxa de resfriamento sensível [W]

Este campo representa a taxa de resfriamento sensível em Watts.

5.7 Estratégias de análise de dados

Os dados coletados nas etapas descritas anteriormente são evidências, tanto quantitativas quanto qualitativas, que irão tratar as proposições iniciais do projeto de pesquisa (YIN,2003). A estratégia analítica geral baseia-se na proposição teórica que levaram ao objetivo do estudo.

Na sequência será apresentada a estratégia de análise dos dados coletados pela etapa de simulação.

5.7.1 Simulação

Os dados coletados através das simulações serão fornecidos por um programa computacional baseado em equações matemáticas, ou seja, resultam da aplicação de modelos determinísticos que dispensam o uso de métodos estatísticos para sua análise, como mapeamento das incertezas, distribuição de probabilidades, entre outros.

Como estratégia de análise dos dados, será utilizada a análise sensível de resultados. Na simulação algumas variáveis são dependentes, como temperatura exterior, horário do dia, velocidade do vento, umidade relativa do ar; enquanto outras são sensíveis, isto é, determinadas por decisões do projeto, como por exemplo a orientação da fachada ou dimensionamento da cavidade e das aberturas para insuflamento do ar. Neste caso, as variáveis dependentes são dadas pelas suposições climáticas, fornecidas pelo registro das medições de um determinado dia ou período escolhido, que podem ser obtidas junto aos institutos de meteorologia.

Análise de sensibilidade é o estudo de como a variação (incerteza) na saída de um modelo matemático (representado neste caso pelo programa de simulação) pode ser atribuída, qualitativa ou quantitativamente, para diferentes fontes de variação na entrada do modelo. Dito de outra forma, é uma técnica para a sistemática mudança de parâmetros em um modelo para determinar os efeitos de tais alterações.

Para apresentação dos resultados e análises dos resultados das simulações, serão desenvolvidos tabelas, quadros e gráficos.

5.8 Testes de validade

Segundo Robson (2002), a questão central da abordagem científica de uma pesquisa está na avaliação crítica das suas descobertas e interpretações. Em outras palavras, um trabalho científico, para ser considerado pela comunidade válido, deve apresentar como características confiabilidade, validade do constructo, validade interna e externa.

Confiabilidade dos dados obtidos com a pesquisa diz respeito à eliminação dos possíveis erros na observação do fenômeno ou presença de parcialidades ou preconceitos nos participantes ou observadores. Porém, eliminar essas ameaças à validade não é suficiente, sendo necessário ainda desenvolver as questões relativas aos tópicos explicitados a seguir.

5.8.1 Validade do constructo

O objetivo de um projeto de pesquisa descreve a intenção de chegar a um ou mais resultados que respondam à hipótese de trabalho, e para tanto as estratégias e técnicas de coleta de dados devem assegurar que essas descobertas relacionem-se à pergunta do problema colocado. Ou seja, citando Robson (2002): o estudo em andamento produz medições de dados da forma pretendida? Isto é, tem ou não validade de constructo?

Uma das formas sugeridas pelo autor para assegurar a validade do constructo é a utilização de múltiplos métodos de coleta dos mesmos dados, a fim de verificar se ocorre padrão de semelhança nas descobertas obtidas. Por não ser um procedimento viável no presente trabalho, optou-se por pesquisar junto à literatura disponível procedimentos que possam assegurar esta validação. Procedeu-se de duas formas: levantamento junto a textos sobre métodos científicos de pesquisa recomendados pelo curso e análise de artigos científicos com pesquisas semelhantes ao pretendido, onde os estudos realizados apresentaram os resultados pretendidos com sucesso.

5.8.2 Validade externa

A questão da validade externa diz respeito ao conceito de generalização da pesquisa. Segundo Yin (2005), tanto experimentos quanto estudos de caso são generalizáveis cientificamente a proposições científicas, e não a populações ou universos. A intenção não é representar uma amostragem, e sim expandir e generalizar teorias – generalização analítica, e não enumerar frequências – generalização estatística.

Ainda segundo Robson (2002), a validade externa pode ser obtida em um estudo onde o grupo estudado, o contexto ou período é representativo, quando o objetivo central da pesquisa é estabelecer uma proposição ou teoria científica.

No presente trabalho, a investigação trata de um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto, onde os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos (YIN, 2005). Portanto, a validade externa do presente trabalho se dará com a explicitação das estratégias e do protocolo de coleta de dados, a partir da teoria pesquisada, de forma que outro estudo poderá replicar os procedimentos e reproduzir suas principais descobertas.

5.8.3 Validade interna

A validade interna de uma pesquisa aborda questões referentes às ameaças à validade de seus resultados. Em um estudo explicativo, como este, o pesquisador pretende determinar que um evento x levou ao evento y (YIN, 2005), isto é, se o tratamento dado ao objeto de estudo levou aos resultados coletados. Se um terceiro fator, desconhecido pelo pesquisador, causou a alteração dos resultados pós tratamento, isto caracteriza uma ameaça à validade.

A metodologia do desenvolvimento deste estudo, a fim de chegar aos resultados relacionados aos seus objetivos e hipóteses, é baseada em estudos já realizados e publicados em fontes de periódicos científicos reconhecidos. Foram levantados também os resultados que poderiam ser esperados na realização das simulações dos modelos base com adição de fachadas duplas ventiladas. A seleção do programa para as simulações também se baseou em artigos reconhecidos que já haviam utilizado do mesmo com sucesso para análise do uso do sistema de FDV. Esta base teórica serve de referência para a análise dos resultados, assim como o rastreamento de dados espúrios.

Na apresentação dos resultados, procurou-se o entendimento e explanação dos mesmos em termos de processos físicos. As simulações foram conduzidas de forma a apresentar dados de vários aspectos relacionados ao desempenho dos ambientes ocupados, facilitando o rastreamento de ameaças à validade interna do estudo.

5.8.4 Confiabilidade

A confiabilidade, segundo Yin (2005), tem por objetivo certificar-se que os procedimentos realizados pela pesquisa, em suas estratégias e protocolos de coletas de dados, poderão ser seguidos por outros pesquisadores, garantindo a obtenção dos mesmos resultados e conclusões. O propósito da confiabilidade é reduzir a ocorrência de vieses e erros no estudo.

Para tanto, é importante documentar rigorosamente os procedimentos adotados na coleta de dados. Isto envolve, primeiramente, a descrição acurada dos passos a serem seguidos pelo protocolo de coleta, para que o processo seja o mais operacional possível. Deve-se, também, desenvolver um banco de dados com todas as informações levantadas por cada técnica de pesquisa e os resultados e conclusões parciais dos procedimentos realizados (YIN, 2005). A confiabilidade demanda um grande rigor no planejamento do protocolo e no registro dos passos seguidos, de forma a constituir um documento que permita repetir exatamente o que foi feito para se chegar aos mesmos resultados.

Estes procedimentos foram seguidos pela presente pesquisa, na etapa de realização da coleta de dados, para garantir a confiabilidade do estudo, e são descritos com maior profundidade na descrição das simulações do modelo A e B.

6. SIMULAÇÕES DO MODELO A: ESCRITÓRIO TIPO SALA COMERCIAL

O modelo A representa uma unidade de sala comercial, ou escritório individual, de um edifício de Curitiba. As simulações do modelo A, de natureza mais simples, objetivaram a análise da influência das FDV no desempenho de um ambiente de escritório, em Curitiba, e também a otimização de alguns parâmetros do sistema para utilização nas simulações do modelo B. Para tanto, uma sequência de simulações foram executadas investigando as variáveis de temperatura, consumo de energia para condicionamento, fluxo de ar para ventilação natural, entre outros. Esta sequência será detalhada ao longo do texto.

O modelo A, configurado com fachada simples, representa o modelo base para comparação com o modelo A com adição da fachada dupla ventilada. Têm-se desta forma dois grupos de simulações: modelo A – FS (fachada simples) e modelo A – FDV (fachada dupla ventilada). Os modelos foram modelados no programa de simulação com a mesma geometria, orientação, altura do solo e materiais. O FDV receberá o tratamento com os fatores controláveis definidos na revisão bibliográfica, de forma a investigar a sensibilidade do sistema quanto à variação da profundidade da cavidade, presença de proteção solar, tipo de vidro e orientação. A composição que apresentar o melhor desempenho geral será utilizada como parâmetro para a configuração do modelo B.

6.1 Descrição do modelo

O modelo A representa uma sala de um edifício comercial composto de pavimentos tipo semelhante, utilizado como escritório. A composição da unidade a ser estudada baseou-se no levantamento de edifícios semelhantes pesquisados junto ao mercado imobiliário.

6.1.1 Seleção do modelo do escritório

A configuração do **modelo A** foi obtida pela pesquisa de empreendimentos comerciais de unidades de escritórios (ou salas comerciais) recentes da cidade de Curitiba. Foram levantadas informações básicas sobre oito lançamentos do mercado imobiliário, a partir do ano 2008. Nesta pesquisa foi constatado que, com exceção de um edifício, existem semelhanças quanto à área, dimensões, materiais de construção e configuração do pavimento

tipo entre as unidades disponíveis. A maior variação entre empreendimentos está no número de pavimentos das torres. A figura abaixo demonstra os resultados obtidos pelo levantamento.









ITEM	NOME	IMAGEM	ÁREA UNIDADE (m ²)	LARGURA (m)	PROFUNDIDADE (m)	NÚM. PAV.
1	THA- New concept		8.52	3.52	5.00	16
2	Rossi - Universe life square		39.24	5.45	7.20	20
3	Gafisa - Neo Business		29.26	3.85	7.60	24
4	Camargo Correa - MID		37.55	4.92	7.64	20
5	Cyrella - Infinity prime offices		35.19	5.10	6.90	8
6	Office life		49.67	6.45	7.70	20
7	Iguaçu 2820		33.64	5.80	5.80	21
8	Helbor offices champagnat		37.49	5.10	7.35	26
MÉDIA (desconsiderando o Item 1)			37.43	5.02	6.90	19.38

Figura 6.1. Definição do modelo A : salas comerciais - escritório.

A partir deste levantamento, constatou-se que as unidades de salas comerciais têm, na média, 37,43 m² de área, com dimensões de 5,02 metros de largura por 6,90 metros de profundidade. Os edifícios têm, na média, 19,38 pavimentos. Para simplificar a configuração

do modelo A, optou-se pelas seguintes medidas: 5 metros de largura por 7 metros de profundidade, resultando em 35,00 m² de área.

6.1.2 Definição do modelo de escritório

Foi escolhido o décimo pavimento para realização das simulações. Pelo levantamento, os edifícios pesquisados apresentam na média 20 pavimentos, então foi escolhida a altura mediana destes exemplos. Os tipos são subdivididos entre nove e doze unidades, em torno de 35 m² de área útil, com módulo de serviços, elevadores e escadas centrais (FIGURA 6.2).

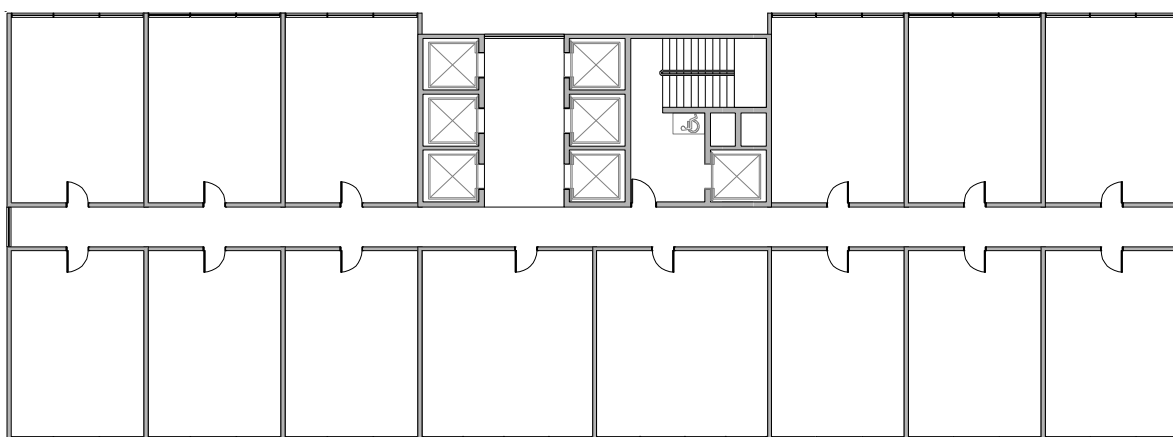


Figura 6.2 - Pavimento tipo de edifício comercial - exemplo

O pé direito considerado é de 3,60 metros, que representa a altura máxima entre lajes pela legislação da Prefeitura Municipal de Curitiba. A orientação da fachada longitudinal do edifício, escolhida para implantação do sistema de FDV, é a norte.

Para enfatizar os resultados obtidos, a sala comercial foi modelada com a fachada simples totalmente envidraçada, com WWR^{22} de 85%. A fachada dupla ventilada, do tipo *corridor façade*, também é composta de uma pele de vidro, conformando a cavidade do sistema. A profundidade da cavidade variou nas simulações entre 0,40 e 1,20 metros.

O modelo de sala comercial foi simulado sem considerar a contribuição de cargas térmicas das unidades vizinhas, isto é, entre salas as paredes são definidas como adiabáticas nas simulações, assim como a laje de piso e de teto. A pequena área usualmente destinada à instalação sanitária neste tipo de unidade também foi desconsiderada. Para efeito da

²² WWR (*window to wall ratio*) significa a proporção de panos envidraçados com relação às vedações opacas.

ventilação natural, o modelo virtual considera as aberturas da sala comercial posicionada à frente (FIGURA 6.3), de forma a permitir ventilação cruzada entre fachadas opostas.



Figura 6.3 - Sala comercial que representa o modelo A.

6.1.3 Modelo A – FS

O modelo de sala comercial com fachada simples (FIGURAS 6.4 e 6.5) tem as características como descrito abaixo:

- Área da sala comercial: 35 m².
- Pé-direito: 3,60 m, não considerando uso de forro.
- Ocupação (baseada no índice da NBR 9077-2001): 1 pessoa/ 7 m² útil (ABNT, 2001), ou seja, cinco ocupantes.
- Materiais dos elementos construtivos:
 - Paredes: alvenaria de blocos cerâmicos.
 - Laje de piso e de teto: concreto.
 - Forro: não utilizado.
 - Fachada cortina: vidro simples, transparente e incolor.

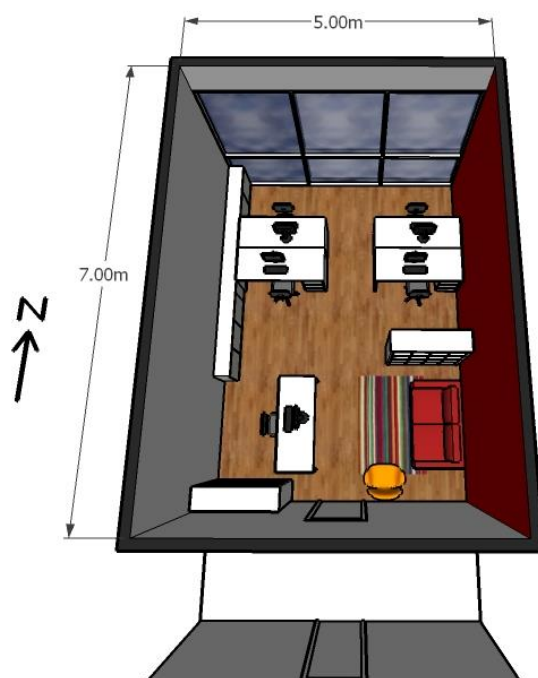


Figura 6.4 - Planta da sala comercial : Modelo A - FS



Figura 6.5 - Corte da sala comercial : Modelo A - FS

6.1.4 Modelo A – FDV

O modelo de sala comercial com fachada dupla ventilada (FIGURA 6.6) tem a mesma composição do modelo A – FS, com acréscimo da pele envidraçada para configurar a cavidade. O vidro considerado para este fechamento é do tipo temperado, transparente e incolor, com 12 milímetros de espessura. As partes superiores e inferiores da cavidade são em laje de concreto, enquanto a frente e as laterais são envidraçadas.



Figura 6.6 - Corte da sala comercial : Modelo A – FDV.

6.2 Descrição das simulações

6.2.1 Zonas térmicas

Para as simulações foram consideradas as seguintes zonas térmicas (FIGURA 6.7):

- Zona do escritório: é a única zona considerada ocupada, referência para a análise das temperaturas, demanda por condicionamento artificial e demais variáveis investigadas. Conecta-se com o exterior ou com a zona da cavidade, no caso do modelo A – FDV, e com a zona do corredor. Não troca calor com as unidades adjacentes.
- Zona do corredor: nas simulações, está limitada à abrangência da sala comercial analisada. Conecta-se com as zonas dos escritórios.

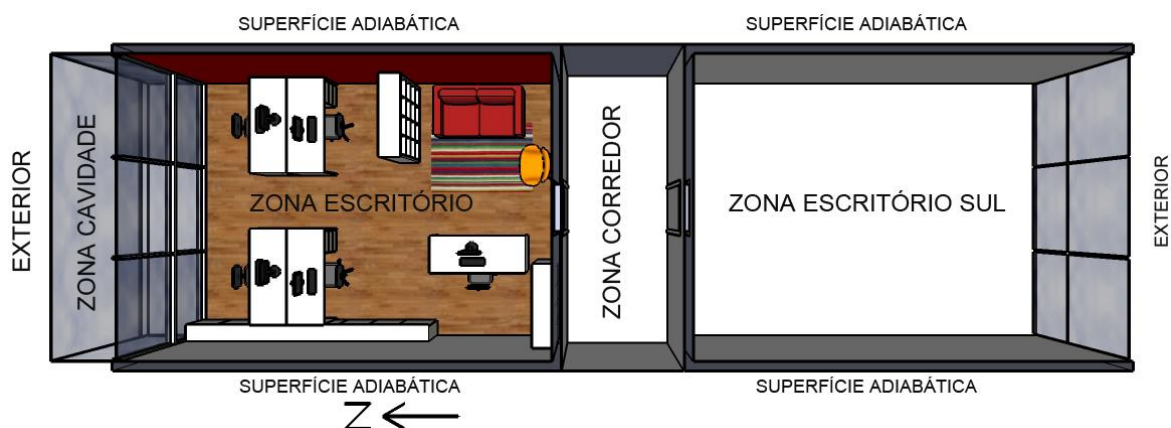


Figura 6.7 - Distribuição das zonas térmicas utilizadas nas simulações.

- Zona do escritório sul : não ocupada, foi modelada para simular o efeito da ventilação cruzada entre fachadas opostas. Conecta-se com o exterior e a zona do corredor.

- Zona da cavidade: presente apenas no modelo A – FDV. Não tem geração de calor por ocupação. Conecta-se com o exterior e a zona do escritório, configurando uma zona de transição térmica.

6.2.2 Materiais e elementos construtivos

As propriedades dos materiais de construção utilizados nas simulações estão listadas na tabela a seguir. As propriedades dos materiais foram pesquisadas junto à biblioteca desenvolvida por Ordenes *et al.*, 2003, para utilização em simulações computacionais.

Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV							
ELEMENTO CONSTRUTIVO	COMPOSIÇÃO DO ELEMENTO	RUGOSIDADE	ESP. (m)	CONDUTIVIDADE [W/m-K]	DENSIDADE [kg/m ³]	CALOR ESPECÍFICO [J/kg-K]	RESISTÊNCIA TÉRMICA [m ² -K/W]
Parede de alvenaria	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	1000	
	Tijolo 6 furos circ*	Média	0.1	0.9	1232	920	
	Câmara de ar fluxo horizontal*		0.02 a 0.05				0.16
	Tijolo 6 furos circ*	Média	0.1	0.9	1232	1000	
	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	920	
Laje de piso e teto	Concreto*	Rugoso	0.2	1.75	2200	1000	
	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	1000	
	Cerâmica*	Rugoso	0.01	0.9	1600	920	
Porta	Madeira*	Média		0.29	800	1340	

* (ORDENES *et al.*, 2003)

Tabela 6-1 - Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV

As propriedades dos vidros foram definidas a partir da biblioteca de exemplos do próprio *Energy Plus*, e estão listadas abaixo:

Tipo de vidro	U-Factor [W/m ² -K]	SHGC	Transmitância visível
Vidro comum transparente	5.778	0.819	0.881
Vidro temperado transparente	5.558	0.737	0.841

Tabela 6-2 - Tabela de vidros utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV.

O vidro transparente de 3 milímetros de espessura foi utilizado na janela da zona do escritório, enquanto o vidro temperado com 12 milímetros de espessura constitui a fachada dupla ventilada.

6.2.3 Cargas térmicas e rotinas de funcionamento

Foram considerados, como geração de calor interno, as pessoas, os equipamentos elétricos e a iluminação. Como o módulo *AirflowNetwork* foi utilizado nas simulações para ventilação natural, não é necessário considerar a carga térmica associada à infiltração. O programa cria automaticamente frestas em torno das janelas e portas modeladas.

CARGAS TÉRMICAS					
PESSOAS		ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL		EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	
NÚMERO DE OCUPANTES	5	WATTS POR ÁREA DE PISO DA ZONA	12 W/m ² *	WATTS POR ÁREA DE PISO DA ZONA	45 W/m ² *
SCHEDULE	Ocupação	SCHEDULE	Iluminação	SCHEDULE	Equipamentos

* Valores baseados em Pirró e Romero, 2006

Tabela 6-3 - Cargas térmicas utilizadas nas simulações

Cada uma destas categorias de carga térmica têm uma rotina (*schedule*) de funcionamento correspondente. Estas rotinas definem a disponibilidade ou presença dos elementos de carga térmica, proteção solar, ventilação natural, condicionamento artificial, equipamentos elétricos, iluminação e outros que forem necessários. Assim será possível determinar, por exemplo, quando o ambiente está ocupado e gerando calor internamente a partir das fontes citadas acima, assim como a intensidade de uso no período determinado. Os períodos estipulados podem ser anual, semanal, para dias de semana, fins de semana e o horário de funcionamento. As rotinas ou *schedules* são apresentadas na sequência.

· Ocupação:	· Iluminação:	· Equipamentos:
Período: dias da semana. Horários: <ul style="list-style-type: none"> • Das 8h00 às 12h00: 100% de ocupação. • Das 12h00 às 14h00: 50% de ocupação. • Das 14h00 às 18h00: 100% de ocupação. • Das 18h00 às 20h00: 25% de ocupação 	Período: dias da semana. Horários: <ul style="list-style-type: none"> • Das 8h00 às 12h00: 100% de uso. • Das 12h00 às 14h00: 50% de uso. • Das 14h00 às 18h00: 100% de uso. • Das 18h00 às 8h00: 25% de uso. Período: finais de semana e feriados: 25% de uso.	Período: dias da semana. Horários: <ul style="list-style-type: none"> • Das 8h00 às 18h00: 100% de uso. • Das 18h00 às 20h00: 25% de uso.

Tabela 6-4 - Rotinas de funcionamento utilizadas nas simulações.

A carga térmica relacionada à ocupação é de 90 Watts por pessoa, correspondente a uma atividade de baixa intensidade.

6.2.4 Configuração das aberturas para ventilação natural e controles de temperatura

A janela da sala comercial analisada possui área para ventilação natural correspondente a 1/12 da área do piso (FIGURA 6.8). Esta dimensão baseia-se no mínimo de ventilação exigida pela legislação da Prefeitura Municipal de Curitiba. O funcionamento da mesma é deslizante ou de correr. Já as aberturas da fachada dupla abrangem 15% da área envidraçada frontal, de acordo com valores levantados na revisão bibliográfica (FIGURA 6.9).



Figura 6.8 - Dimensões e funcionamento da janela da fachada cortina.
A janela da sala comercial tem dimensões de 1,60 metros de largura por 1,80 metros de altura, correspondentes a aproximadamente 1/12 da área do piso.

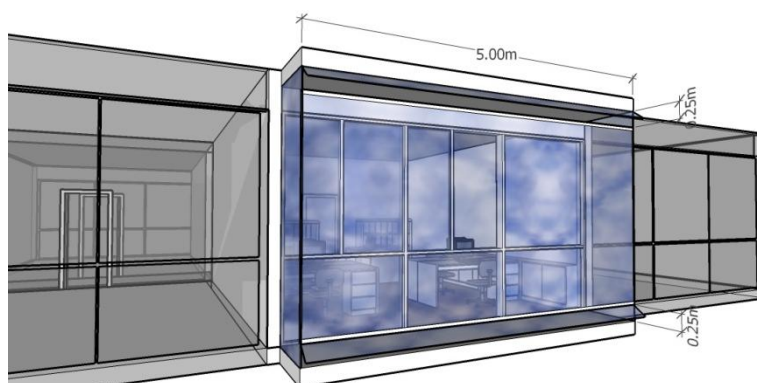


Figura 6.9 - Dimensões e funcionamento das aberturas da fachada dupla ventilada.
As aberturas do fechamento externo da cavidade têm 0,25 metros de altura, pelo comprimento do módulo da fachada, igual a 5 metros. Estas aberturas correspondem a 15% da área do fechamento externo.

A unidade em frente à sala analisada possui uma janela para ventilação natural com igual configuração. A ventilação cruzada pode acontecer entre fachadas opostas pela abertura das janelas e portas de ambas as unidades.

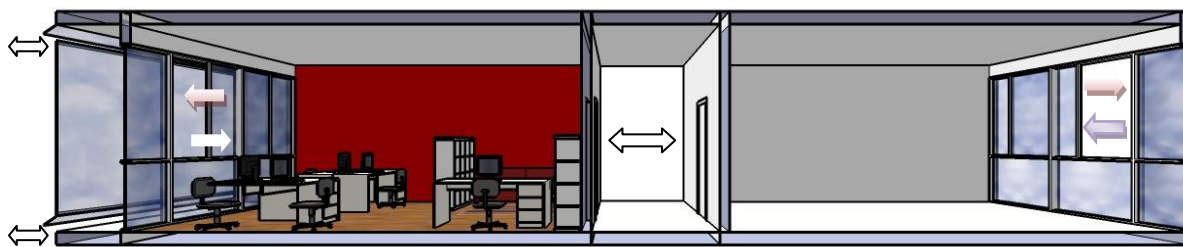


Figura 6.10 - Esquema de ventilação cruzada do modelo A - FDV. São aberturas que permitem a ventilação natural: as esquadrias do fechamento externo da cavidade, a janela da sala comercial com FDV, as duas portas de acesso das salas e a janela da sala com fachada simples.

O funcionamento das esquadrias operáveis é controlado no programa por temperatura, isto é, foi fixado um valor mínimo de temperatura interna, para abertura das esquadrias, e um valor máximo para fechamento das mesmas. O delta de variação para funcionamento da ventilação natural é de 18° C para abertura e 26° C para fechamento, definidos pela *schedule* de controle de ventilação. Esta variação corresponde à faixa de temperaturas onde o edifício pode operar passivamente, critério apresentado na revisão bibliográfica. Além disto, outra rotina foi estabelecida para determinar o período de disponibilidade deste fator, coincidente com as horas de ocupação da sala.

<ul style="list-style-type: none"> • Ventilação:
Período: todos os dias.
Horários: <ul style="list-style-type: none"> • Das 8h00 às 20h00: 100% de disponibilidade.
Controle:
Das 8h00 às 20h00: 100% de disponibilidade. <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura mínima para abertura das esquadrias: 18° C. • Temperatura máxima para fechamento das esquadrias: 26° C.

Tabela 6-5 - Rotinas de ventilação utilizadas nas simulações.

A seguir serão apresentadas algumas especificações de entrada de dados no módulo *AirflowNetwork* do programa.

6.2.4.1 Parâmetros básicos para o cálculo da ventilação.

Os parâmetros de entrada deste objeto foram definidos com as seguintes especificações:

- Tipo de controle da ventilação: o cálculo de ventilação das zonas acontece durante toda a simulação.
- Coeficientes de pressão do vento: calculados pelo programa.

O segundo parâmetro significa que, a partir dos dados climáticos de Curitiba inseridos no programa, os coeficientes de pressão e os ângulos da direção do vento foram gerados automaticamente, e têm por referência de altura o ponto médio da zona analisada. Esta situação pode não representar a realidade, já que o comportamento dos ventos é de difícil previsão, mas o uso desta configuração foi considerado válido por manter a comparação entre modelos nos mesmos termos. Isto é, os coeficientes de pressão e direção dos ventos, em uma determinada data, serão iguais para todas as configurações dos modelos simuladas.

6.2.4.2 Definição das zonas para ventilação natural.

As zonas para uso da ventilação natural são as unidades de escritório, o corredor e a cavidade da fachada dupla ventilada.

6.2.4.3 Propriedades das superfícies para ventilação natural.

As propriedades das superfícies que permitem a ventilação natural incluem a definição do tipo de controle da ventilação (pode ser constante, por temperatura, por entalpia, etc.) e são associadas as *schedules* de ventilação às esquadrias operáveis (isto é, sob quais condições impostas esta ocorrerá). O controle por temperatura, selecionado para as simulações deste estudo, significa que as esquadrias serão abertas se:

- A temperatura da zona for maior que a temperatura externa.
- A temperatura da zona for maior que a temperatura mínima e menor que a temperatura máxima de *set-point* da *schedule* de controle de temperatura.
- A *schedule* de disponibilidade de ventilação permitir (período permitido, neste caso, as horas de ocupação).

Nas simulações, as seguintes superfícies permitem ventilação natural: janela e portado escritório norte, janela e porta do escritório sul. No modelo A-FDV, têm-se mais duas superfícies: abertura inferior e superior da fachada dupla ventilada.

6.2.5 Detalhamento dos componentes das aberturas

Este objeto especifica as propriedades da ventilação natural através das portas e janelas quando estes estão fechados ou abertos. Isto inclui os coeficientes de fluxo de massa do ar quando a abertura está fechada (isto é, a infiltração), as frações de abertura de cada esquadria (totalmente fechada, parcialmente aberta ou totalmente aberta), coeficientes de

descarga quando abertas, entre outros. As especificações de cada parâmetro de entrada relacionado com este objeto são apresentadas no apêndice.

6.2.6 Configuração do condicionamento artificial

A modelagem do sistema de condicionamento artificial foi feita a partir de um modelo disponibilizado pelo próprio programa, na classe de objetos *HVAC Templates*, e representa o uso de condicionadores de ar do tipo *split*. O *EnergyPlus* fornece, como resultados, tanto a demanda em Watts térmicos como de uso final de eletricidade para condicionamento. A energia de condicionamento contabilizada, dada em Watts [W], é corrigida para o consumo de energia elétrica [kWh] por um coeficiente de eficiência energética. Este índice difere para a condição de resfriamento e de aquecimento.

Para as simulações com condicionamento artificial, foram inseridos no programa os dados de temperaturas de dias típicos de projeto da cidade de Curitiba, segundo Goulart *et al.* (1998). O significado de dias de projeto está explanado no capítulo da revisão bibliográfica. A tabela a seguir apresenta os dados deste dias, para inverno (nível 97,5%) e verão (nível 2,5%):

DIA DE PROJETO				
	Temperatura máxima de bulbo seco [C]	Amplitude média [C]	Velocidade do vento [m/s]	Direção do vento
CURITIBA_INVERNO	3.1	10.2	0.5	90
CURITIBA_VERÃO	28.6	10.2	3.9	0

Tabela 6-6 - Dados dos dias de projeto de Curitiba. FONTE: GOULART *et al.*, 1998.

A zona de escritório é o único ambiente condicionado artificialmente. O funcionamento do equipamento de ar condicionado é regulado por um objeto de termostato, que controla as temperaturas internas, e pela *schedule* de condicionamento. Os equipamentos são acionados apenas se as temperaturas internas estiverem fora da faixa definida no objeto termostato, permitindo que nos demais períodos a ventilação natural ainda aconteça. Os dados foram inseridos da seguinte forma no programa:

- *Setpoint* constante de aquecimento: 18° C.
- *Setpoint* constante de resfriamento: 24° C.

A *schedule* de condicionamento define o período em que os equipamentos podem funcionar: durante os dias da semana, das 8 às 20 horas (período de ocupação). Para cada

ocupante, o valor de infiltração de ar externo mínima é de 0,0075 ou 27 m³/h, que atende os valores exigidos pelas normas sanitárias brasileiras.

6.2.7 Configuração da proteção solar

Para configurar a presença de proteção solar nos modelos, foram utilizados elementos definidos como persianas. As persianas consistem de lâminas planas e horizontais, igualmente espaçadas e que permitem diferentes angulações de abertura. Estas diferem de outros elementos de proteção solar, como cortinas ou rolos (considerados difusores da radiação solar), por suas propriedades de reflexão e transmissão solar e de luz visível, dependentes do ângulo definido para as lâminas e do ângulo da incidência solar. São elementos opacos, e apesar de eficientes, reduzem o aproveitamento da luz natural. Em dias muito ensolarados, no entanto, esta redução da entrada da luz solar pode ser desejada.

O *EnergyPlus* tem, em sua biblioteca, referências de propriedades genéricas de persianas, que foram adaptadas para o uso neste estudo. O material da persiana é de alta reflexão, com transmissão solar direta ou difusa igual a zero. As lâminas horizontais têm 5 centímetros de largura, e o ângulo da mesma é de 45 graus.

No modelo A-FS, a proteção solar foi locada junto à fachada cortina do ambiente. Já no modelo A-FDV, a persiana encontra-se junto aos vidros da fachada dupla, no interior da cavidade, distantes 15 centímetros do vidro. Para o período de resfriamento do ambiente (períodos de maior calor), a proteção solar foi considerada sempre presente. No programa, foram seguidos os seguintes passos:

1. Definição do material da persiana no objeto *WindowMaterial:blind*.
2. Associação deste elemento às esquadrias selecionadas.
3. Criação da *schedule* de uso do elemento.
4. Definição do tipo de controle da persiana.

6.2.8 Configuração dos tipos de vidro alternativos

Outra variação imposta aos modelos refere-se ao tipo de vidro utilizado nos fechamentos. Foram utilizados dois tipos de envidraçamento: vidro duplo e vidro refletivo. O vidro duplo compõe-se de dois *floats* de vidro transparente formando uma câmara de ar

estanque com 20 milímetros de espessura. As propriedades físicas destes elementos estão listadas na tabela a seguir.

Tipo de vidro	U-Factor [W/m ² -K]	SHGC	Transmitância visível
Vidro refletivo	4.974	0.321	0.201
Vidro transparente 6 mm (para a janela de vidro duplo)	5.894	0.861	0.898

Tabela 6-7 – Propriedades físicas dos vidros alternativos nas simulações.

O modelo A-FDV foi configurado com o vidro alternativo (duplo ou refletivo) na pele externa ou na pele interna, sendo que a restante manteve a especificação original.

6.2.9 Configuração da orientação da fachada

Outro fator que pode alterar significativamente o desempenho das soluções de fachadas adotadas neste estudo é a orientação solar da mesma. Para tanto, os modelos foram simulados para três orientações diferentes, além da adotada nas outras rodadas, a saber: leste, sul e oeste. O texto apresentado neste capítulo até agora tratou da definição do modelo de sala comercial utilizada e da configuração do mesmo no programa, além das variações impostas ao modelo original. Na sequência, são apresentados o planejamento das rodadas de simulações e os resultados obtidos em cada uma delas.

6.3 Planejamento das simulações

O fator considerado de primeiro nível e com maior influência no desempenho do sistema é a profundidade da cavidade (ver descrição do método de pesquisa). Os resultados obtidos com a variação deste fator (primeira e segunda rodadas) foram determinantes para a definição dos modelos de FDV utilizados na sequência de otimização de alguns parâmetros do sistema, com os demais fatores controláveis (tipo de vidro, uso de proteção solar, entre outros).

As simulações foram planejadas em diferentes rodadas sequenciais. Cada rodada de simulações apresentada corresponde a variações dos modelos e/ou verificação de diferentes variáveis de resposta. Esta foi uma opção de apresentação das simulações do estudo para facilitar o entendimento dos resultados obtidos. As rodadas de simulações representam a investigação em separado dos seguintes modelos e variáveis de resposta:

- 1ª rodada: abrange os modelos FS e FDV (com profundidades de cavidades variando de 40 a 120 centímetros), e investiga as temperaturas internas na zona do escritório resultantes dos tratamentos de fachada.
- 2ª rodada: abrange os modelos FS e FDV (com profundidades de cavidades variando de 40 a 120 centímetros), e investiga a demanda por condicionamento térmico artificial na zona do escritório resultante dos tratamentos de fachada.
- 3ª rodada: abrange os modelos FS e FDV_40 (com profundidade de cavidade de 40 centímetros), e investiga a transferência de calor na zona do escritório resultante dos tratamentos de fachada.
- 4ª rodada: abrange os modelos FS, FDV_40 e FDV_80, e investiga a ventilação natural na zona do escritório resultante dos tratamentos de fachada.
- 5ª rodada: abrange os modelos FS e FDV_40, e investiga a influência da orientação na demanda por condicionamento artificial na zona do escritório.
- 6ª rodada: abrange os modelos FS e FDV_40, e investiga a influência do uso de diferentes tipos de vidro na demanda por condicionamento artificial na zona do escritório.
- 7ª rodada: abrange os modelos FS e FDV_40, e investiga a influência do uso da proteção solar nas temperaturas internas e na demanda por condicionamento artificial na zona do escritório. Nesta rodada foi considerado um cenário passivo (sem condicionamento artificial) e um cenário com condicionamento artificial da zona ocupada.

Os modelos utilizados na primeira, terceira e quarta rodadas são os mais básicos, sem acréscimo de condicionamento artificial, tipos de vidro alternativos ou proteção solar. Já a segunda e quinta rodadas consideram uso de condicionamento artificial. A sexta e a sétima rodadas são de otimização do sistema, apresentando as variações de tipo de vidro e de uso de proteção solar. A tabela abaixo representa o planejamento das simulações descrito anteriormente, com o tratamento dado a cada modelo na rodada. As duas primeiras rodadas de simulações abrangem seis modelos, incluindo o modelo A-FS e o modelo A-FDV com cinco profundidades diferentes de cavidade. Com a análise dos resultados, definiu-se qual a profundidade que resulta no melhor desempenho do sistema. As rodadas subsequentes foram realizadas para um menor número de modelos, de acordo com a variável de resposta investigada.

1ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS FDV*	Ventilação natural quando possível Sem proteção solar Vidro simples e comum	Temperaturas internas Horas ocupadas na faixa de temperaturas

* Profundidades das cavidades do FDV: 40, 60, 80, 100 e 120 centímetros.

2ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS FDV*	Condicionamento artificial Ventilação natural quando possível Sem proteção solar Vidro simples e comum	Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento

* Profundidades das cavidades do FDV: 40, 60, 80, 100 e 120 centímetros.

3ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS	Ventilação natural quando possível	Transmissão de calor – ganho de calor por convecção através das superfícies [W]
	FDV_40** FDV_80***	Sem proteção solar Vidro simples e comum	Transmissão de calor - Transmissão solar [W] Transmissão de calor - Temperatura da superfície envidraçada

** Profundidade da cavidade do FDV: 40 centímetros.

*** Profundidade da cavidade do FDV: 80 centímetros.

4ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS	Ventilação natural quando possível	Ventilação natural - Volume do fluxo de ar [m3/s]
	FDV_40** FDV_80***	Sem proteção solar Vidro simples e comum	

** Profundidade da cavidade do FDV: 40 centímetros.

*** Profundidade da cavidade do FDV: 80 centímetros.

5ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS FDV_40**	Condicionamento artificial Ventilação natural quando possível Sem proteção solar Vidro simples e comum	Orientação - Temperaturas internas Orientação - Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] Orientação - Energia elétrica [kWh]

** Profundidade da cavidade do FDV: 40 centímetros.

6ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS FDV_40**	Condicionamento artificial Ventilação natural quando possível Sem proteção solar Vidro duplo ou refletivo	Tipo de vidro - Temperaturas internas Tipo de vidro - Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] Tipo de vidro - Energia elétrica [kWh]

** Profundidade da cavidade do FDV: 40 centímetros.

7ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA
	FS FDV_40**	Condicionamento artificial Ventilação natural Ventilação noturna da FDV Proteção solar	Proteção solar - Temperaturas internas Proteção solar - Horas ocupadas na faixa de temperaturas Proteção solar - Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] Proteção solar - Energia elétrica [kWh]

** Profundidade da cavidade do FDV: 40 centímetros.

Tabela 6-8 - Planejamento das rodadas de simulações.

6.4 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das rodadas de simulações executadas para o modelo A, de acordo com o planejamento apresentado na tabela 6.8.

6.4.1 Primeira rodada

O objetivo desta rodada é analisar a sensibilidade do sistema à variação da profundidade da cavidade, considerando a variável de resposta temperatura interna [°C]. Compreende seis modelos, um com fachada simples e os demais com cavidades com profundidade de 0,40 a 1,20 metros. Nesta rodada, foi modelado o sistema de ventilação natural com controle de temperatura, como explicado anteriormente, mas não há efeito de condicionamento artificial ou uso de proteção solar.

A tabela abaixo registra os resultados obtidos na rodada de simulações, comparando as temperaturas internas médias na zona de escritório, para cada mês do ano. É interessante observar, nesta primeira análise, que a temperatura média do ambiente do escritório aumenta conforme a profundidade da cavidade é maior. O modelo FDV-40 apresenta temperaturas internas menores que o modelo de fachada simples, enquanto os demais apresentam um aumento gradativo desta.

Data	Zona escritório						
	EXTERIOR [°C]	Fs [°C]	FDV_40 [°C]	FDV_60 [°C]	FDV_80 [°C]	FDV_100 [°C]	FDV_120 [°C]
JANEIRO	20.6	26.3	25.5	26.1	26.8	27.5	27.6
FEVEREIRO	20.7	26.6	25.8	26.4	27.0	27.7	27.8
MARÇO	19.6	26.0	25.3	25.8	26.3	27.0	27.1
ABRIL	16.3	24.5	24.4	24.8	25.4	25.9	25.9
MAIO	14.6	22.9	23.0	23.5	24.0	24.7	24.6
JUNHO	13.1	22.1	22.3	22.8	23.4	24.0	23.9
JULHO	12.5	22.3	22.6	23.0	23.6	24.2	24.2
AGOSTO	13.6	23.3	24.0	24.3	24.7	25.3	25.2
SETEMBRO	15.3	23.4	23.0	23.4	24.0	24.8	24.7
OUTUBRO	14.2	21.7	21.2	21.8	22.6	23.5	23.5
NOVEMBRO	18.0	24.4	23.7	24.3	25.0	25.8	25.9
DEZEMBRO	17.8	24.3	23.7	24.3	25.0	25.7	25.8
TEMPERATURA MÉDIA ANUAL_ZONA ESC [C]	16.4	24.0	23.7	24.2	24.8	25.5	25.5

Tabela 6-9 - Tabela de temperaturas internas comparativas da zona escritório.

A tabela a seguir, por outro lado, registra os resultados obtidos na rodada de simulações, comparando as temperaturas internas médias na zona da cavidade, para cada mês do ano.

Data	Zona cavidade					
	EXTERIOR [°C]	FDV_40 [°C]	FDV_60 [°C]	FDV_80 [°C]	FDV_100 [°C]	FDV_120 [°C]
JANEIRO	20.6	23.3	23.6	24.1	24.6	24.6
FEVEREIRO	20.7	23.7	24.0	24.4	24.9	25.0
MARÇO	19.6	22.8	23.1	23.5	24.0	24.0
ABRIL	16.3	21.1	21.3	21.7	22.1	22.1
MAIO	14.6	19.4	19.6	20.0	20.5	20.5
JUNHO	13.1	18.3	18.6	18.9	19.5	19.4
JULHO	12.5	18.3	18.5	19.0	19.5	19.5
AGOSTO	13.6	19.7	19.9	20.2	20.6	20.5
SETEMBRO	15.3	19.6	19.9	20.4	21.0	21.0
OUTUBRO	14.2	18.0	18.4	19.0	19.7	19.7
NOVEMBRO	18.0	21.1	21.5	22.1	22.6	22.7
DEZEMBRO	17.8	21.1	21.4	22.0	22.5	22.6
TEMPERATURA MÉDIA ANUAL_ZONA CAV [C]	16.4	20.5	20.8	21.3	21.8	21.8

Tabela 6-10 - Tabela de temperaturas internas comparativas da zona cavidade.

As temperaturas no interior da cavidade variam entre 2,1 e 4,7° C com relação às temperaturas internas do ambiente, sendo a diferença menor nos meses de maior calor (quando há maior ventilação no sistema), e maiores nos meses de frio. Isto se deve porque a cavidade foi configurada no programa de forma a não permitir ventilação natural em temperaturas abaixo de 18° C.

O gráfico a seguir apresenta a diferença entre estas temperaturas (do escritório e da cavidade), para todos os modelos. A partir da profundidade de 1 metro da cavidade, as temperaturas tendem a se estabilizar e não apresentar variação significativa (de forma que é difícil distinguir a curva correspondente ao FDV_100 do FDV_120).

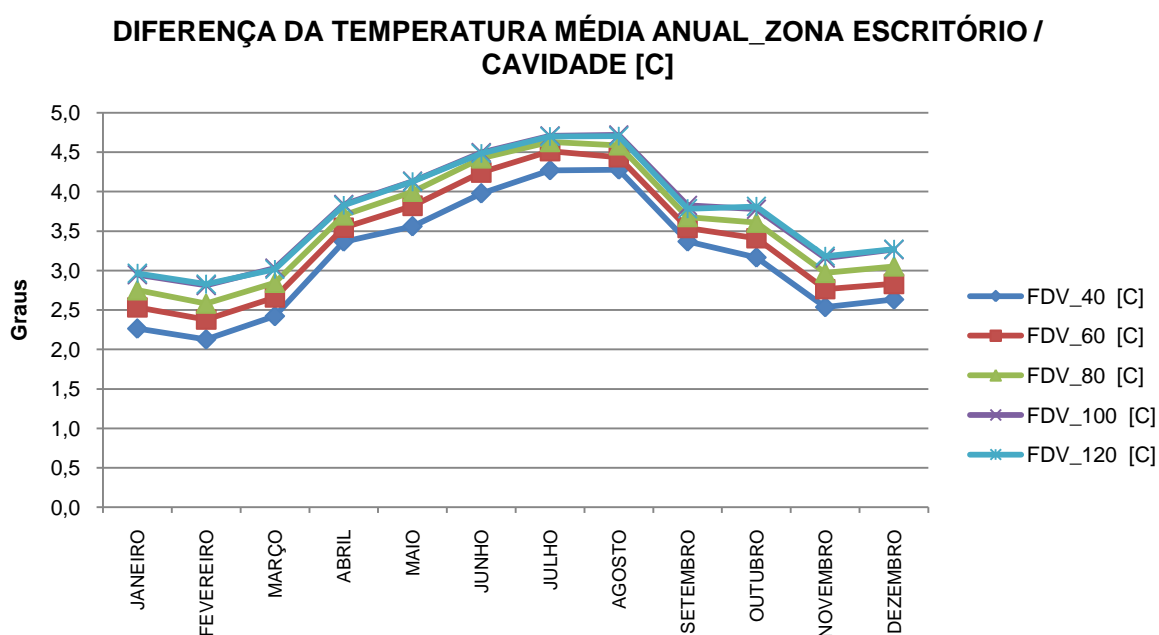


Figura 6.11 - Gráfico da diferença de temperaturas internas entre a zona de escritório e a zona da cavidade.

Outro resultado a ser analisado são as horas de ocupação em que as temperaturas internas da zona escritório estão fora da zona de operação passiva estipulada no estudo, assim com as temperaturas máximas e mínimas. Estas são apresentadas na tabela a seguir.

Número de horas fora da faixa operação passiva 18-26°C - Zona escritório						
Modelo	FS	FDV 40	FDV 60	FDV 80	FDV 100	FDV 120
Horas de temperatura acima de 26°C	1072	1383	1614	1902	2220	2223
Horas de temperatura abaixo de 18°C	166	22	10	7	5	4
Total de horas fora da faixa de operação passiva	1238	1405	1624	1909	2225	2227
Diferença com relação a FS [%]		13%	31%	54%	80%	80%
Horas fora da faixa de operação passiva/ Horas de ocupação [%]	26.1%	29.6%	34.2%	40.2%	46.9%	46.9%
Percentual de horas acima de 26°C	22.6%	29.1%	34.0%	40.1%	46.8%	46.8%
Percentual de horas abaixo de 18°C	3.5%	0.5%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
Temperatura máxima [C]	32.8	32.5	32.9	33.0	33.8	34.0
Temperatura mínima [C]	15.7	16.3	17.0	17.3	17.6	17.7

Tabela 6-11 - Horas de temperaturas fora da faixa de operação passiva e temperaturas extremas, durante o período de ocupação da zona escritório.

O número de horas ocupadas é 4745. O modelo FS apresentou o menor número de horas de temperatura acima de 26° C, porém o maior número de horas abaixo de 18° C. Com a fachada simples, o percentual de horas de operação passiva é de 73,9%, contra 70,4% do

modelo FDV 40. Já o FDV 100, poderia operar passivamente apenas 53,1% do período de ocupação. Com o aumento da profundidade da cavidade, observa-se o significativo aumento de horas com temperaturas internas altas, e redução nas horas de frio. Este assunto será retomado na discussão dos resultados.

6.4.2 Segunda rodada

O objetivo da segunda rodada é analisar comparativamente o consumo de condicionamento para a zona de escritório dos modelos com FS e FDV. Os resultados obtidos entre os diferentes modelos de FDV também são analisados, a fim de determinar a profundidade ótima a ser adotada no restante das simulações. As variáveis de resposta são: taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] e energia elétrica [kWh] para condicionamento. Nesta rodada, a única variação com relação à anterior é o acréscimo de condicionamento artificial, modelado de acordo com as especificações apresentadas anteriormente. A tabela a seguir apresenta a demanda média por mês de condicionamento térmico nos diferentes modelos.

Data	Zona escritório											
	FS [W]		FDV_40 [W]		FDV_60 [W]		FDV_80 [W]		FDV_100 [W]		FDV_120 [W]	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
JANEIRO	0	793	0	579	0	680	0	808	0	949	0	965
FEVEREIRO	0	807	0	584	0	668	0	780	0	903	0	915
MARÇO	0	618	0	457	0	517	0	605	0	706	0	708
ABRIL	1	511	0	428	0	476	0	545	0	628	0	616
MAIO	65	331	1	285	1	320	0	369	0	428	0	415
JUNHO	302	288	16	260	9	294	8	344	7	397	5	385
JULHO	372	307	21	282	15	325	16	378	12	446	11	428
AGOSTO	328	437	19	392	15	427	9	473	5	526	4	509
SETEMBRO	50	377	5	258	3	301	4	362	2	436	2	427
OUTUBRO	150	203	5	101	5	140	3	194	1	263	0	268
NOVEMBRO	0	459	0	299	0	372	0	467	0	579	0	589
DEZEMBRO	0	456	0	304	0	385	0	487	0	599	0	613
MÉDIA DO CONDICIONAMENTO - ANO_ZONA ESC [W]	106	466	6	352	4	409	3	484	2	572	2	570

Tabela 6-12 - Demanda média do condicionamento térmico nos diferentes modelos.

A energia de condicionamento contabilizada, dada em Watts [W], é corrigida para o consumo de energia elétrica [kWh] por um coeficiente de eficiência energética. Este índice,

nas simulações, é de 2,7 para a condição de resfriamento e de 1 para o aquecimento. Desta forma, a necessidade por aquecimento dos ambientes é mais significativa para a determinação da eficiência do sistema de fachada estudado. Devido ao menor uso de aquecimento nos ambientes proporcionado pelos modelos com FDV, todos apresentaram consumo de energia elétrica menor que o modelo com FS. A tabela a seguir registra os resultados obtidos deste consumo no ano.

	Zona escritório											
	FS [kWh]		FDV_40 [kWh]		FDV_60 [kWh]		FDV_80 [kWh]		FDV_100 [kWh]		FDV_120 [kWh]	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	936	1524	49	1153	35	1321	29	1560	18	1816	15	1815
Total Eletricidade [kWh]	2460		1203		1355		1589		1834		1830	
Subtotal diferença com relação a FS [%]			-95%	-24%	-96%	-13%	-97%	2%	-98%	19%	-98%	19%
Total diferença com relação a FS [%]				-51%		-45%		-35%		-25%		-26%

Tabela 6-13 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.

O modelo FDV_40 apresentou o menor consumo de energia elétrica no total, em torno de 51% de redução com relação ao com FS. A partir do modelo FDV_80, o consumo para resfriamento do ambiente torna-se maior que o modelo com fachada simples. A partir da profundidade de 1 metro, a exemplo do ocorrido na análise das temperaturas internas, o consumo de eletricidade total estabiliza. A energia necessária para aquecimento, como esperado devido aos resultados da primeira rodada, apresenta uma significativa redução com o acréscimo da FDV.

O gráfico abaixo representa estes resultados de forma a tornar mais clara a diferença de consumo entre modelos.

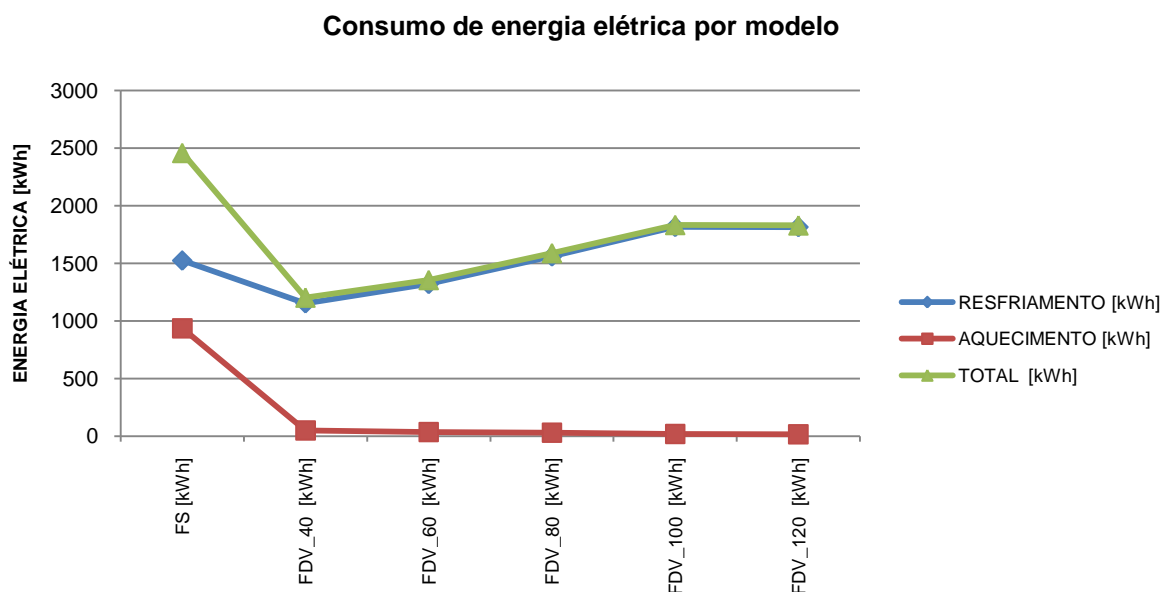


Figura 6.12 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.

Outro resultado a ser analisado é o número de horas em que a zona do escritório necessita de condicionamento artificial nos diferentes modelos. Há diferença entre estes valores e o número de horas fora da faixa de temperaturas de operação passiva, apresentada na rodada anterior. Em parte isto se dá pela definição do *set point* no termostato do sistema, entre 18 e 24° C, enquanto a faixa para o ambiente ventilado naturalmente é entre 18° C e 26° C. A tabela abaixo registra estes resultados.

Número de horas de condicionamento artificial no ano						
Modelo	FS	FDV 40	FDV 60	FDV 80	FDV 100	FDV 120
Aquecimento	382	147	125	107	91	90
Resfriamento	1918	1943	2044	2285	2409	2310
Total de horas condicionadas	2300	2090	2169	2392	2500	2400
Diferença de horas de condicionamento entre modelos		-9%	-6%	4%	9%	4%

Tabela 6-14 - Horas de uso de condicionamento artificial na zona do escritório nos diferentes modelos.

Os modelos FDV_40 e 60 apresentaram também redução nas horas de uso de condicionamento artificial com relação ao com FS, 9 e 6% respectivamente. A partir desta profundidade de cavidade, a tendência é de aumento do total das horas de condicionamento.

6.4.3 Terceira rodada

Nesta rodada, as variáveis de resposta referem-se ao desempenho dos tipos de fachadas quanto à transferência de calor, representadas neste estudo pelas variáveis de ganho de calor por convecção e transmissão solar direta e difusa dos modelos. São elementos de transmissão solar, nesta análise: a fachada cortina envidraçada, da zona do escritório, e as peles de vidro da fachada dupla ventilada, a norte, leste e oeste. Também será analisada a temperatura das superfícies envidraçadas da zona escritório, fator relacionado com a sensação de conforto dos ocupantes do ambiente.

Foram selecionados os modelos FS e o FDV_40, sem uso de proteção solar ou de condicionamento artificial.

6.4.3.1 Transmissão solar

São investigadas duas variáveis de transmissão solar neste estudo: direta e difusa.

A transmissão solar direta é dada pela radiação solar transmitida por uma janela exterior, cuja origem é o feixe solar incidente no exterior da janela. Se houver outra janela, como no caso da fachada dupla, este item inclui o feixe de radiação solar difusa.

A transmissão solar difusa, por outro lado, compreende a radiação solar direta e difusa combinadas, incidentes nas zonas adjacentes (exterior ou outra zona), e posteriormente refletidas nas superfícies dessas zonas (tornando-se difusas através dessa reflexão), e então retransmitidas através das janelas interiores do ambiente analisado. A transmissão solar total é a soma das duas variáveis.

A tabela a seguir apresenta a transmissão solar direta, difusa e total média por mês e anual dos modelos FS e FDV_40. Nesta primeira análise, verificou-se que há uma grande diferença entre os modelos, principalmente com relação à transmissão difusa, ao se considerar a zona do escritório. Isto é, a presença da segunda pele e da cavidade, no modelo com FDV, proporciona a redução significativa da entrada desta radiação no ambiente interno. A transmissão solar para a zona da cavidade é muito próxima à recebida pelo escritório com uso de FS.

Data	Zona escritório - Transmissão solar						Zona Cavidade - Transmissão solar		
	FS			FDV_40			FDV_40		
	DIRETA [W]	DIFUSA [W]	TRANSMISSÃO O SOLAR TOTAL [W]	DIRETA [W]	DIFUSA [W]	TRANSMISSÃO O SOLAR TOTAL [W]	DIRETA [W]	DIFUSA [W]	TRANSMISSÃO O SOLAR TOTAL [W]
JANEIRO	16	807	823	2	41	42	85	849	934
FEVEREIRO	90	830	921	36	43	79	145	862	1007
MARÇO	316	810	1125	269	34	303	327	824	1150
ABRIL	558	821	1379	603	32	634	528	819	1347
MAIO	526	675	1201	615	26	641	487	668	1155
JUNHO	693	605	1298	832	23	855	639	594	1233
JULHO	738	566	1304	879	22	901	679	558	1237
AGOSTO	771	731	1502	876	28	904	718	726	1445
SETEMBRO	408	725	1133	395	29	424	395	731	1126
OUTUBRO	134	763	897	77	35	113	161	783	944
NOVEMBRO	25	826	851	5	41	45	78	862	940
DEZEMBRO	4	805	809	0		0	94	848	942
Transmissão solar média no ano - ZONA ESC [W]	356	747	1104	382	32	412	361	760	1122

Tabela 6-15 - Transmissão solar média dos modelos FS e FDV.

O modelo FDV_40 apresentou aumento de 7% na transmissão direta para o interior do escritório, no entanto, a redução da transmissão difusa foi de 96%. A redução na transmissão solar total do FDV foi de 63% com relação ao FS. O valor da radiação direta maior, no caso do FDV, se explica pela definição da variável de resposta dada pelo programa, explicada acima, porque inclui parte da radiação difusa. Para confirmar esta tendência representada pelas médias, dias específicos foram investigados hora a hora, e os resultados serão apresentados na sequência. As datas selecionadas correspondem às mudanças de estação do ano, isto é, os solstícios.

- Início do verão: 22 de dezembro. O gráfico abaixo registra os resultados obtidos no período das 6 às 20 horas deste dia, quanto à transmissão solar direta e difusa, para cada modelo, e o total de transmissão solar.

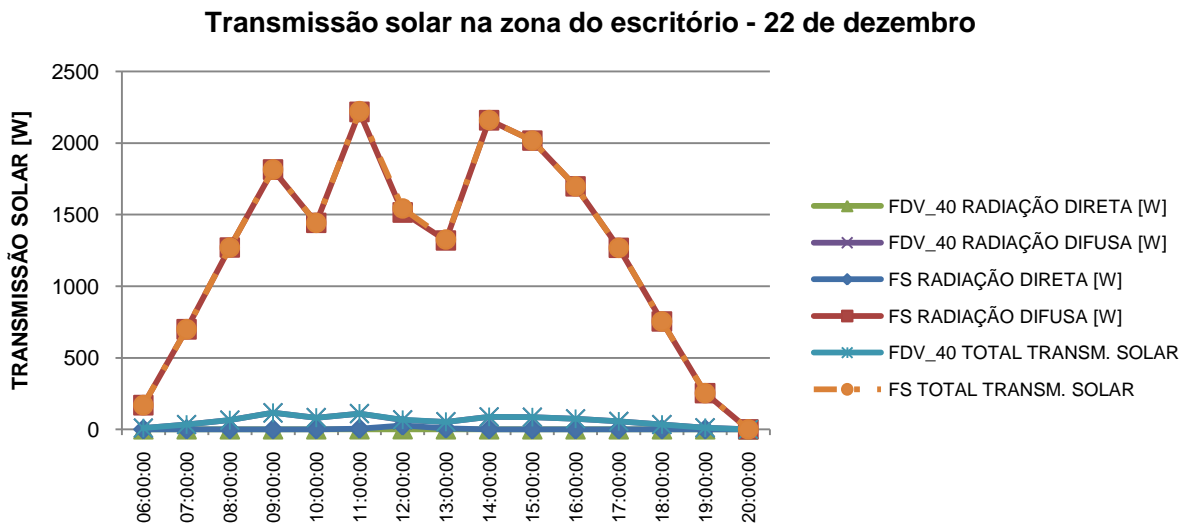


Figura 6.13 - Gráfico da transmissão solar na zona escritório no dia 22 de dezembro.

Nesta data, o sol encontra-se na sua inclinação máxima com relação ao solo. Portanto, devido à orientação norte da fachada, a entrada de radiação direta é menor que em outras épocas do ano, sendo o efeito da radiação difusa o mais intenso. A transmissão solar total apresentou cerca de 95% de redução, no modelo FDV_40, com relação ao modelo FS. Como a transmissão direta é pequena nesta data, a curva que representa a radiação total e a difusa no modelo FS estão coincidentes no gráfico.

- Início do inverno: 21 de junho. O gráfico abaixo registra os resultados obtidos no período das 6 às 20 horas deste dia, quanto à transmissão solar direta e difusa.

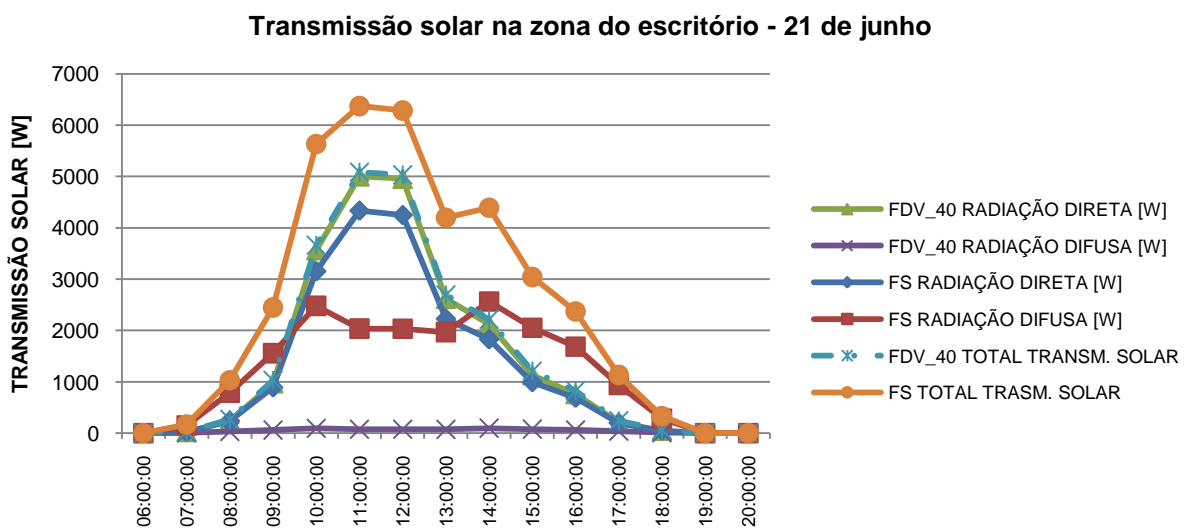


Figura 6.14 - Gráfico da transmissão solar na zona escritório no dia 21 de junho.

Nesta data, o sol encontra-se na sua inclinação mínima, no hemisfério sul, com relação ao solo. Portanto, devido à orientação norte da fachada, a entrada de radiação direta é maior que em outras épocas do ano, sendo o efeito mais intenso. No modelo FDV_40, a transmissão solar difusa apresentou cerca de 96% de redução com relação ao modelo FS, enquanto a transmissão direta aumentou 20% comparativamente. No total, a redução é de 40% no FDV_40.

6.4.3.2 Transferência de calor por convecção

São investigadas duas variáveis de transferência de calor por convecção nesta rodada: taxa de convecção das superfícies da zona escritório e ganho de calor por convecção na superfície da janela²³. A primeira variável refere-se à soma, em watts, do calor transferido para o ar da zona a partir de todas as superfícies, no período estipulado na simulação. Já a segunda, fornece o calor transferido da face interna da superfície para o ar da zona. A tabela a seguir apresenta a taxa de convecção das superfícies da zona e ganho de calor por convecção na superfície da janela, média por mês e anual dos modelos FS, FDV_40 e FDV_80.

Data	Zona escritório - Transferência de calor por convecção					
	FS		FDV_40		FDV_80	
	TAXA CONVECÇÃO NA ZONA [W]	ganho de calor por convecção [J]	TAXA CONVECÇÃO NA ZONA [W]	ganho de calor por convecção [J]	TAXA CONVECÇÃO NA ZONA [W]	ganho de calor por convecção [J]
JANEIRO	339,57	-494997593	-0,26	-399985253	228	-229655665
FEVEREIRO	360,84	-452894302	0,34	-351688506	216	-194693768
MARÇO	486,54	-530714442	117	-389896199	300	-222328242
ABRIL	578,99	-644113997	212	-424642804	361	-263461493
MAIO	472,86	-673777386	159	-446761368	304	-299155373
JUNHO	476,07	-726199245	201	-453479487	349	-311330946
JULHO	334,59	-802272455	56	-497640608	212	-339192044
AGOSTO	610,88	-800654743	291	-488393670	427	-320487853
SETEMBRO	336,31	-666619219	7	-445301433	151	-287661908
OUTUBRO	245,26	-674127838	-106	-460019723	76	-305429515
NOVEMBRO	248,75	-557870581	-70	-412848833	144	-252266711
DEZEMBRO	251,23	-594824013	-60	-437455092	167	-265824531
Transmissão solar média no ano _ ZONA ESC [W]	395	-634922151	67	-434009415	245	-274290671

Tabela 6-16 - Transferência de calor por convecção nos modelos.

²³ Taxa de convecção das superfícies [W] - É a soma, em watts, do calor transferido para o ar da zona a partir de todas as superfícies. Ganho de calor por convecção [J] - É o calor transferido da face interna da superfície para o ar de zona.

O valor negativo para a variável ganho de calor significa, na verdade, que as janelas da zona perde calor para o exterior (no FS) e para a cavidade (no FDV). Nesta análise, verificou-se que há diferença entre os modelos, com relação às duas variáveis investigadas de transferência de calor por convecção, considerando a zona do escritório. Nos modelos com FDV, observa-se que tanto a taxa de convecção das superfícies, como a perda de calor, são menores que no modelo com FS. Comparando a perda de calor na janela, o modelo com FDV_40 apresenta redução de 32% com relação à fachada simples, enquanto o FDV_80 apresenta redução de 57%. Este dado relaciona-se com o maior isolamento proporcionado pela adição da fachada dupla ventilada ao modelo, e ajuda a explicar também porque os modelos FDV demandam menor consumo de energia para condicionamento artificial. Observa-se nas simulações, também, que o aumento da profundidade da cavidade levou à redução da perda de calor pela janela do escritório.

6.4.3.3 Temperaturas das superfície da janela

A temperatura interna dos vidros é outro parâmetro típico de desempenho de fachadas, porque tem um grande efeito sobre o conforto térmico dos ocupantes da zona de perímetro. Segundo a norma ISO 7730/94 , diz que a assimetria da temperatura radiante devido a janelas ou outras superfícies verticais frias deve ser menor que 10 °C. Qualquer superfície que exceda este intervalo causa desconforto por assimetria térmica. A análise desta variável foi realizada para a janela da zona escritório, para os modelos FS e FDV_40, em um dia de verão e um de inverno. Os gráficos gerados também apresentam as temperaturas do ambiente para efeitos de comparação, nos mesmos períodos.

- Início do verão: 22 de dezembro. O gráfico a seguir apresenta os resultados obtidos no período das 1 às 24horas deste dia, quanto às temperaturas do exterior, do escritório nos dois modelos e as superfícies das janelas em ambos.

Analisando o gráfico, é possível observar que a temperatura da superfície interna da janela no modelo FS tende a aproximar-se das variações da temperatura exterior, enquanto a janela do modelo FDV apresenta uma diferença menor com relação às condições do ambiente interno.

22 de dezembro - Temperatura da superfície interna da janela do escritório [C]

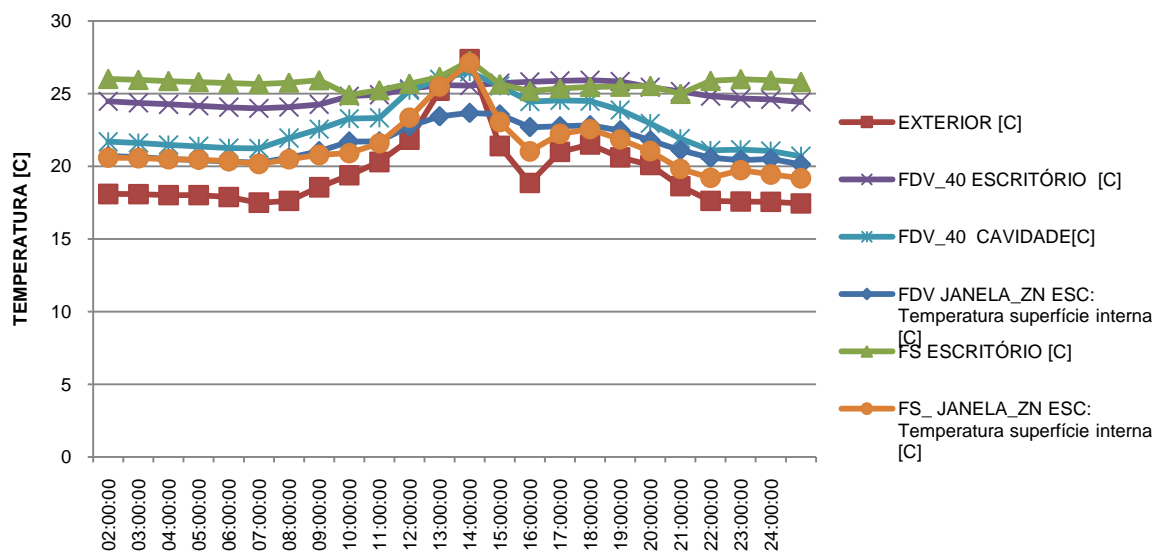


Tabela 6-17 - Temperaturas da superfície interna da janela e do ambiente nos modelos para 22 de dezembro.

O gráfico a seguir apresenta a diferença das temperaturas internas e das superfícies dos fechamentos envidraçados. A diferença entre as temperaturas do ambiente e da superfície interna da janela fica abaixo de 10° C nos dois modelos, no período de ocupação do escritório. A diferença no modelo com fachada simples é maior que na fachada dupla, na maior parte do tempo, sendo que esta última apresenta uma variação menor.

22 de dezembro - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela [C]



Tabela 6-18 - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela nos modelos.

- Dia de inverno: 10 de julho. O gráfico abaixo apresenta os resultados obtidos no período das 1 às 24 horas deste dia, quanto às temperaturas do exterior, do escritório nos dois modelos e as superfícies das janelas em ambos.

10 de julho - Temperatura da superfície interna da janela do escritório [C]

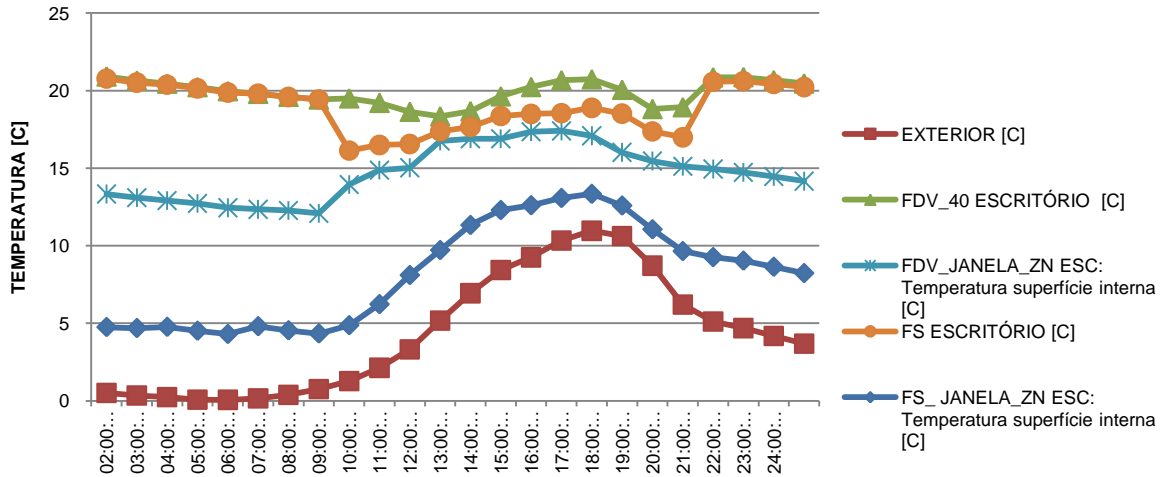


Tabela 6-19 - Temperaturas da superfície interna da janela e do ambientes nos modelos para 10 de julho.

Neste dia, as temperaturas externas estão baixas, enquanto os ambientes conseguem preservar uma temperatura mais próxima à faixa de conforto. A temperatura da superfície interna da janela no modelo FS, como na análise anterior, tende a aproximar-se das variações da temperatura exterior, promovendo uma maior amplitude entre as temperaturas que no modelo FDV.

10 de julho - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela [C]

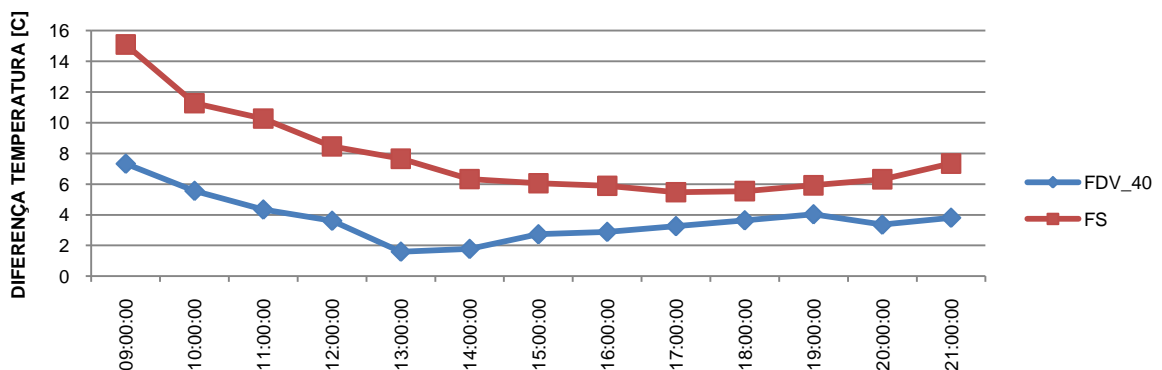


Tabela 6-20 - Diferença entre as temperaturas da zona e da superfície da janela nos modelos.

O gráfico anterior apresenta a diferença das temperaturas internas e das superfícies dos fechamentos envidraçados. A diferença entre as temperaturas do ambiente e da superfície interna da janela ficou acima de 10° C no modelo FS, no período três horas de ocupação do escritório. A diferença no modelo com fachada simples é maior que na fachada dupla, causando desconforto por assimetria térmica no período da manhã.

6.4.4 Quarta rodada

O objetivo desta rodada é investigar o comportamento da ventilação natural na zona do escritório e da cavidade, nos modelos FS e FDV_40 e 80. Optou-se por analisar dois modelos de FDV para estabelecer se há diferença entre diferentes profundidades de cavidade quanto à ventilação do ambiente analisado. Todas as rodadas anteriores consideraram o uso de ventilação natural, mas será nesse item do texto que seu efeito será melhor apresentado.

Os modelos foram simulados sem o acréscimo de condicionamento artificial ou uso de proteção solar, mas com o controle de temperatura definido pelas *schedules* de funcionamento da ventilação apresentados anteriormente. O período em que pode haver ventilação é coincidente com o horário de ocupação do edifício, e está disponível para as temperaturas internas entre 18 e 26° C.

As variáveis de resposta investigadas são o volume de fluxo de ar que circula pelas aberturas das zonas do escritório e da cavidade, do nó 1 (localizado no interior da zona) para o nó 2 (localizado no exterior da zona), nos dois sentidos. Este fluxo foi contabilizado desta forma devido ao uso da abordagem por fluxo de rede ou *airflow network*. As aberturas que permitem a ventilação são: abertura superior e inferior da pele externa da FDV, janela no escritório norte, portas do corredor e janela do escritório sul (FIGURA 6.15). Desta forma, a ação da ventilação cruzada entre fachadas opostas é possível. A configuração deste efeito foi especificada no texto anteriormente.

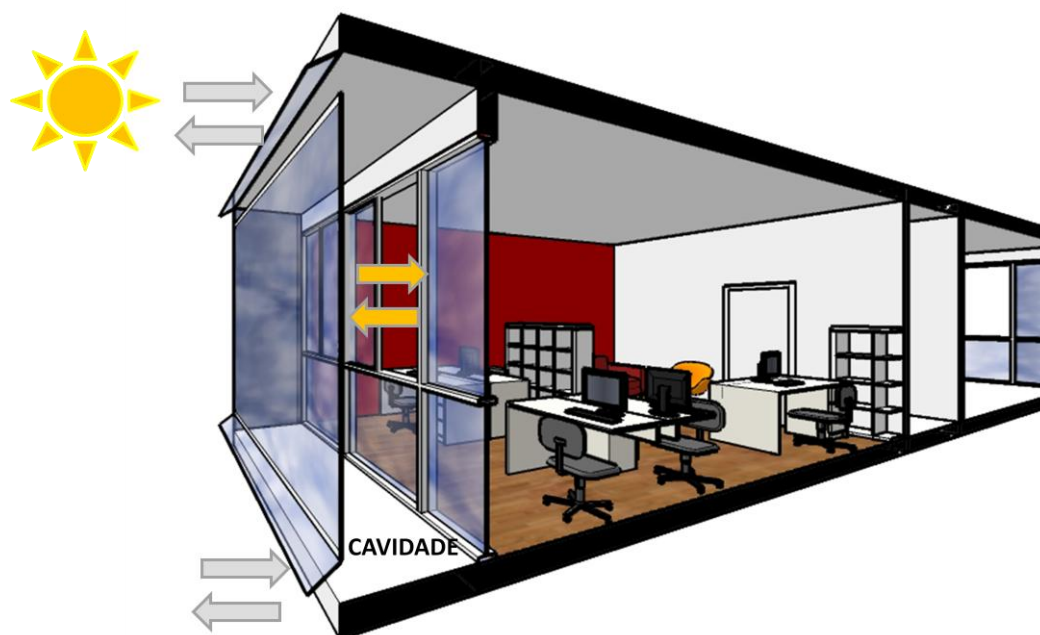


Figura 6.15 - Detalhe das aberturas das esquadrias da FDV e do escritório.

A tabela a seguir registra os resultados obtidos na rodada de simulações, comparando fluxo de ar médio na zona de escritório e da cavidade, para cada mês do ano.

Data	Zona escritório							
	EXTERIOR		FS		FDV_40		FDV_80	
	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]	DIREÇÃO DO VENTO [GRAU]	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m ³ /s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m ³ /s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m ³ /s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m ³ /s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m ³ /s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m ³ /s)
JANEIRO	3.52	136.46	0.23	0.28	0.21	0.24	0.25	0.28
FEVEREIRO	3.21	124.80	0.26	0.21	0.23	0.18	0.25	0.21
MARÇO	3.02	107.99	0.26	0.19	0.24	0.16	0.25	0.19
ABRIL	3.12	105.17	0.21	0.19	0.19	0.18	0.21	0.20
MAIO	2.69	110.86	0.16	0.21	0.15	0.20	0.17	0.21
JUNHO	3.46	112.15	0.11	0.25	0.12	0.24	0.13	0.26
JULHO	2.65	109.30	0.11	0.17	0.12	0.16	0.14	0.18
AGOSTO	3.17	120.30	0.16	0.18	0.17	0.19	0.18	0.20
SETEMBRO	3.41	118.71	0.18	0.17	0.17	0.15	0.19	0.17
OUTUBRO	3.77	97.28	0.15	0.16	0.13	0.14	0.16	0.16
NOVEMBRO	4.01	128.63	0.20	0.21	0.18	0.18	0.21	0.22
DEZEMBRO	4.43	98.14	0.21	0.20	0.19	0.17	0.23	0.21
Volume de ar MÉDIO ANUAL_ZONA ESC [m3/s]			0.188	0.204	0.176	0.184	0.196	0.207

Tabela 6-21 - Fluxo de ar médio dos modelos FS e FDV.

O fluxo do ar, do nó 1 para o nó 2, é induzido pela diferença de pressão ou de temperatura entre fachadas, isto é, caracteriza ventilação cruzada. Esta ocorre quando a direção do vento está entre 90 e 270 graus (sentido horário) com relação ao norte (FIGURA 6.16), ou seja, este não incide diretamente sobre a fachada das zonas analisadas (fachada norte). Já a direção do vento entre 270 e 90 graus (sentido horário) significa que este está agindo sobre a fachada, e passa a dominar o sentido do fluxo do ar do nó 2 para o 1. Nesta primeira análise, verificou-se que há prevalência da ventilação originada pela ação do vento.

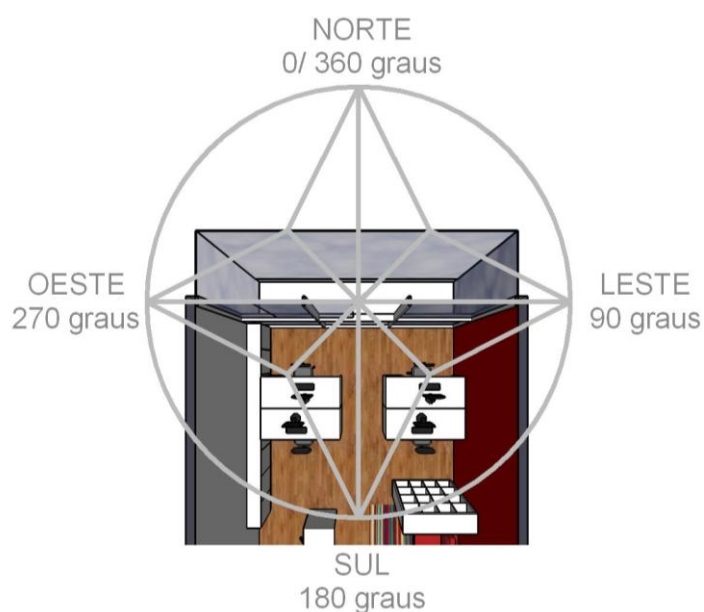


Figura 6.16 - Direção dos ventos na fachada analisada.

Comparando os resultados médios, verifica-se que o modelo FDV_40 apresenta um volume de fluxo do ar 7% (no sentido do nó 1 para o 2) e 2% (no sentido do nó 2 para o 1) menores que o modelo com FS. Já o modelo FDV_80, proporciona um maior volume de ar nos dois sentidos, 4 e 10% respectivamente, comparando com a fachada simples.

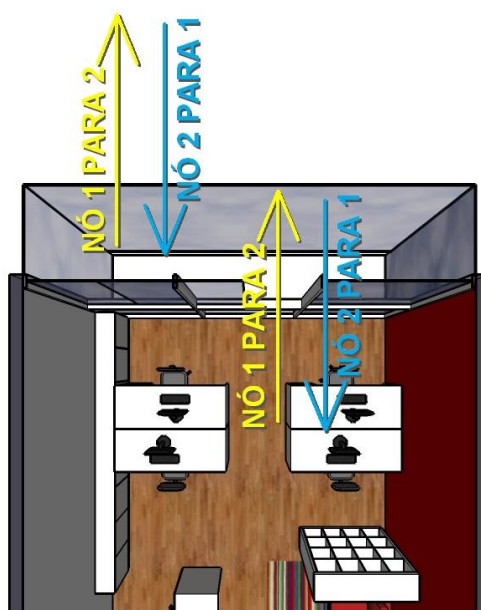


Figura 6.17 - Sentido do fluxo do ar da ventilação natural da zona escritório e zona da cavidade.

Dias específicos foram analisados com os valores do fluxo do ar dos modelos registrados hora a hora. As datas foram selecionadas por dois critérios principais: disponibilidade de ventilação durante a ocupação (isto é, esquadrias abertas no maior período do dia) e direção predominante do vento.

- Data 20 de março. Neste dia, a velocidade do vento foi considerada entre 4 e 6,6 m/s, um com média de 4,9m/s, pouco acima da média anual de Curitiba (próxima a 3 m/s). A direção do vento predominante é leste (FIGURA 6.18), até o período das 16 horas, aproximando-se do nordeste a partir deste horário.

A tabela a seguir apresenta os resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m^3/s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 20 de março. Observa-se que a ventilação cruzada é o efeito dominante enquanto o vento está posterior ou paralelo à fachada. Quando o vento atinge a fachada, a partir das 17 horas, a fluxo do ar dominante passa a ser de fora para dentro. As trocas de ar no escritório são maiores no modelo FS, e menores no FDV_40.

HORA	Zona escritório							
	EXTERIOR		FS		FDV_40		FDV_80	
	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]	DIREÇÃO DO VENTO [O]	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)
08:00	4,0	96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
09:00	4,6	106	1,24	0,10	1,09	0,01	1,08	0,01
10:00	3,8	104	1,03	0,18	0,86	0,06	0,86	0,06
11:00	4,3	100	1,03	0,21	0,81	0,06	0,82	0,07
12:00	5,0	94	0,85	0,32	0,68	0,21	0,69	0,23
13:00	5,6	90	0,58	0,49	0,52	0,46	0,54	0,48
14:00	6,6	90	0,59	0,49	0,52	0,46	0,54	0,48
15:00	5,8	90	0,57	0,47	0,51	0,45	0,53	0,47
16:00	5,0	90	0,57	0,47	0,50	0,44	0,52	0,46
17:00	4,4	78	0,08	0,93	0,13	0,96	0,15	0,97
18:00	4,6	76	0,01	1,00	0,07	1,04	0,09	1,05
19:00	5,6	86	0,15	0,67	0,21	0,70	0,23	0,72
20:00	4,8	90	0,51	0,47	0,47	0,44	0,49	0,46
MÉDIA	4,9	91,5	0,6	0,45	0,49	0,41	0,50	0,42
NÚMERO DE TROCAS DE AR/HORA			16,8	13,5	14,8	12,3	15,2	12,7

Tabela 6-22 – Tabela dos resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m3/s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 20 de março.

O gráfico abaixo registra os resultados obtidos no período das 6 às 20 horas deste dia, quanto ao volume do fluxo do ar na zona do escritório, no sentido do nó 1 para o 2 (de dentro da zona para o exterior).

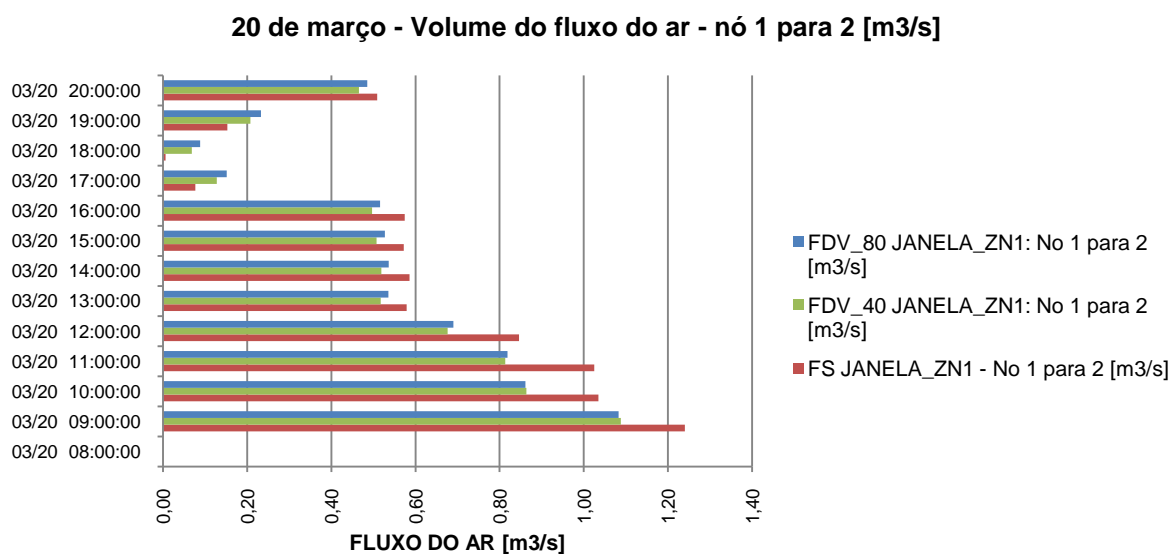


Figura 6.18 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de dentro para fora da zona.

O fluxo do ar do modelo FDV_40, neste sentido, na média é 12% menor que o modelo FS, enquanto o modelo FDV_80 apresenta uma redução de 9% com relação ao com fachada simples. Ao longo do dia, com a variação da direção do vento, há uma gradativa diminuição do fluxo no sentido de fora para dentro, correspondente à ação do vento atuando diretamente sobre a fachada analisada a partir das 16 horas.

O gráfico a seguir registra os resultados do volume do fluxo do ar na zona do escritório, no sentido do nó 2 para o 1 (do exterior para o interior da zona). O fluxo do ar passa a ser maior neste sentido com a ação do vento sobre a fachada.

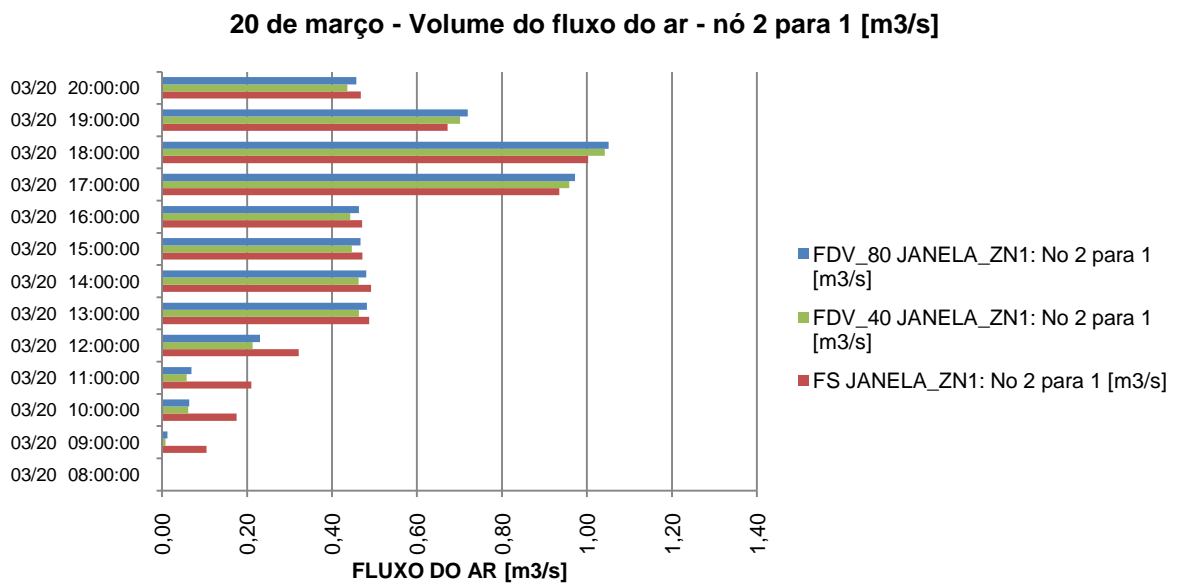


Figura 6.19 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de fora para dentro da zona.

O terceiro aspecto a ser analisado refere-se ao comportamento do fluxo do ar nas aberturas da cavidade. O gráfico a seguir apresenta os resultados, hora a hora, considerando separadamente a abertura inferior (ABINF) e a superior (ABSUP) da pele externa da cavidade, do modelo FDV_40.

20 de março - Volume do fluxo do ar nas aberturas da cavidade [m³/s]

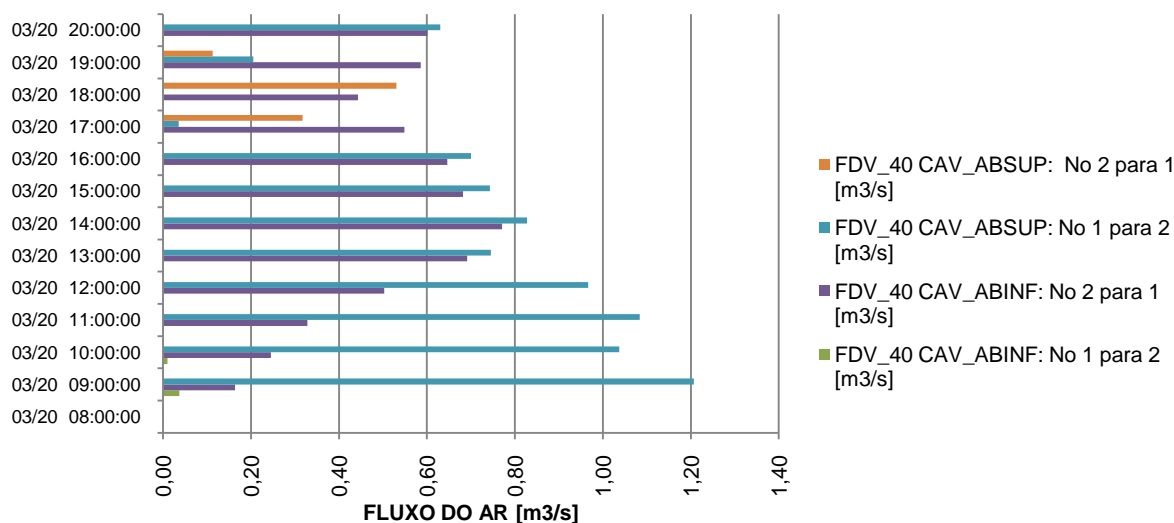


Figura 6.20 - Volume do fluxo do ar nas aberturas da cavidade – modelo FDV_40.

A partir destes resultados, é possível observar que, sem a ação do vento diretamente sobre a fachada analisada, o efeito chaminé no interior da cavidade é significativo. A abertura inferior da fachada dupla apresenta o maior fluxo no sentido do exterior para o interior da zona, enquanto a prevalência, na abertura superior, é do fluxo no sentido de dentro para fora da cavidade. Ou seja, esta última está funcionando como um elemento de exaustão do ar do ambiente do escritório para o exterior, através da ação da ventilação cruzada. O sentido é invertido a partir do momento em que a direção do vento passa a agir sobre as aberturas, e as duas passam a ventilar predominantemente de fora para dentro.

Já o próximo gráfico apresenta a velocidade média do ar no período analisado, na janela da zona do escritório, considerando os três modelos. Verifica-se que a abertura com maior fluxo do ar pertence ao modelo FS, seguido do modelo FDV_80 e, por último, o FDV_40. Esta redução pode ser considerada benéfica, já que o controle da velocidade do ar é um fator a ser buscado pelas fachadas em edifícios altos e sujeitos a ventos fortes.

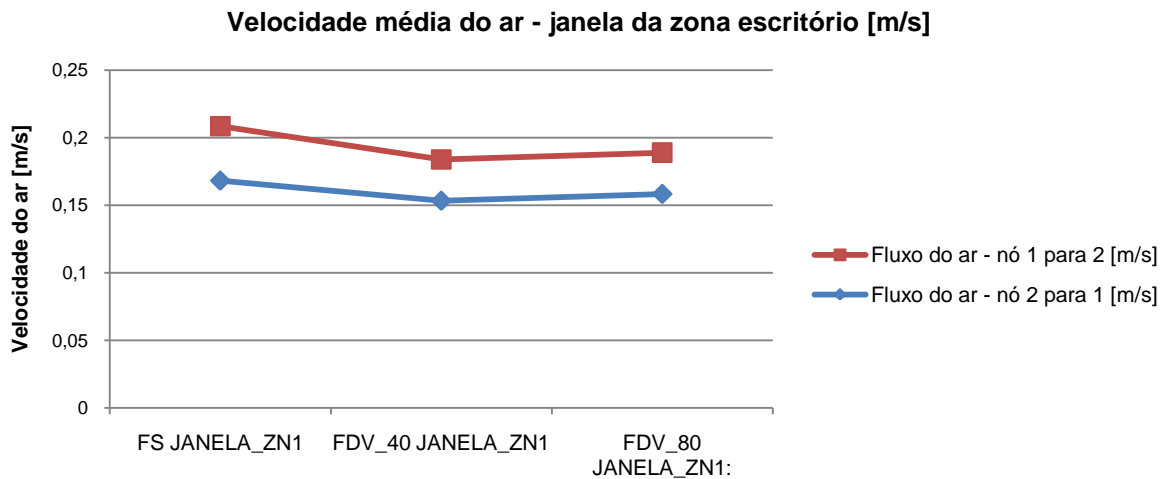


Figura 6.21 - Velocidade do ar na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.

O gráfico a seguir apresenta os fluxos do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação. No início do dia a ação da ventilação de dentro para fora do ambiente é prevalente, havendo em seguida um período de equilíbrio entre os dois sentidos (correspondente à direção do vento paralela à fachada) e a inversão do sentido do fluxo no final do dia.

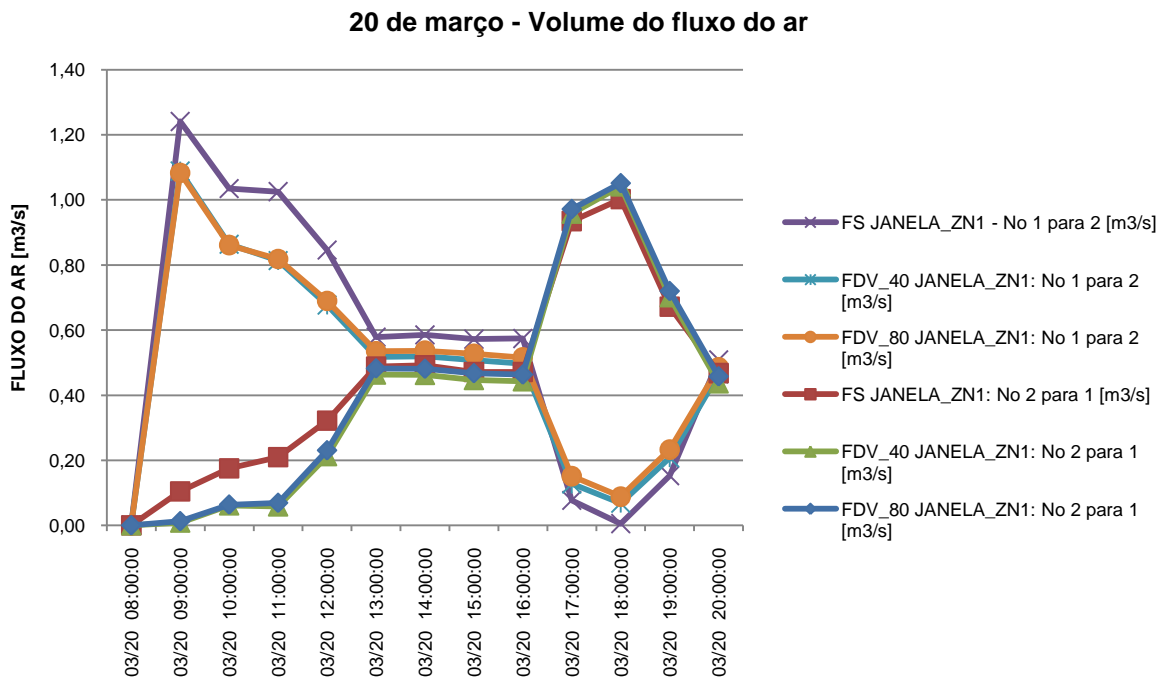


Figura 6.22 - Volume do fluxo do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.

• Data 20 de setembro. Neste dia, a velocidade do vento foi considerada entre 0 e 8,25 m/s, com média de 5 m/s. A direção do vento predominante é noroeste e norte, até o período das 19 horas, aproximando-se do sudoeste a partir deste horário e às 11 horas da manhã. Ou seja, a direção do vento está atuando sobre a fachada na maior parte do dia.

A tabela a seguir apresenta os resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m³/s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 29 de setembro. Observa-se que devido à combinação da velocidade e direção do vento predominante neste dia, a ventilação de fora (nó 2) para dentro (nó 1) é o efeito dominante.

HORA	Zona escritório							
	EXTERIOR		FS		FDV_40		FDV_80	
	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]	DIREÇÃO DO VENTO [º]	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 1 PARA 2 (m3/s)	FLUXO DO AR - NÓ 2 PARA 1 (m3/s)
08:00	1,1	34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
09:00	0,0	0	0,55	0,53	0,37	0,38	0,37	0,39
10:00	1,9	19	0,26	0,66	0,32	0,64	0,32	0,65
11:00	3,6	218	0,63	0,61	0,56	0,44	0,58	0,43
12:00	4,6	330	0,00	1,83	0,28	1,18	0,27	1,22
13:00	5,0	330	0,00	2,00	0,26	1,29	0,26	1,28
14:00	5,6	318	0,00	2,14	0,01	2,02	0,01	2,00
15:00	7,3	298	0,00	2,34	0,00	2,27	0,00	2,26
16:00	7,4	284	0,00	1,72	0,00	1,69	0,00	1,68
17:00	8,3	286	0,08	1,56	0,10	1,40	0,02	1,93
18:00	7,1	278	0,37	0,38	0,40	0,37	0,12	1,18
19:00	7,3	264	1,16	0,01	1,12	0,01	1,12	0,01
20:00	6,1	254	1,26	0,13	1,12	0,11	1,10	0,12
MÉDIA	5,0	223,8	0,3	1,07	0,35	0,91	0,32	1,01
NÚMERO DE TROCAS DE AR/ HORA			10,0	32,3	10,5	27,4	9,7	30,6

Tabela 6-23 - Tabela dos resultados da velocidade e direção do vento, volume do fluxo do ar em m³/s por hora e trocas de ar em cada modelo, na data de 29 de setembro.

O gráfico abaixo registra os resultados obtidos no período das 6 às 20 horas deste dia, quanto ao volume do fluxo do ar na zona do escritório, no sentido do nó 1 para o 2 (de dentro da zona para o exterior).

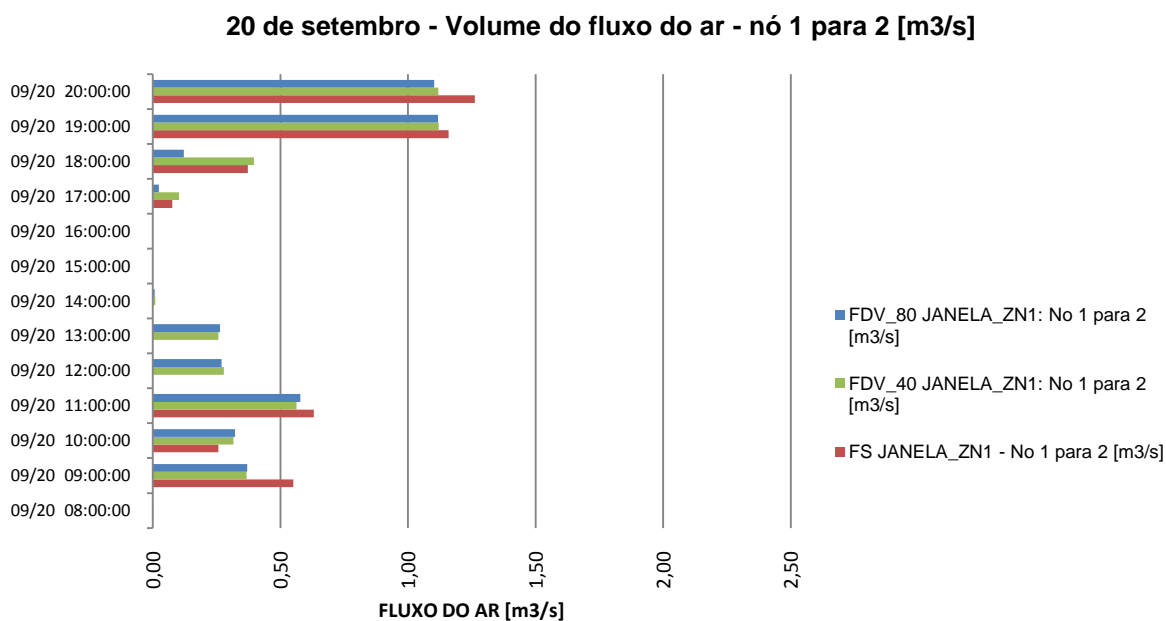


Figura 6.23 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de dentro para fora da zona.

O fluxo do ar do modelo FDV_40, neste sentido, na média é 5% maior que o modelo FS, enquanto o modelo FDV_80 apresenta uma redução de 3% com relação ao com fachada simples. O gráfico a seguir registra os resultados do volume do fluxo do ar na zona do escritório, no sentido do nó 2 para o 1 (do exterior para o interior da zona).

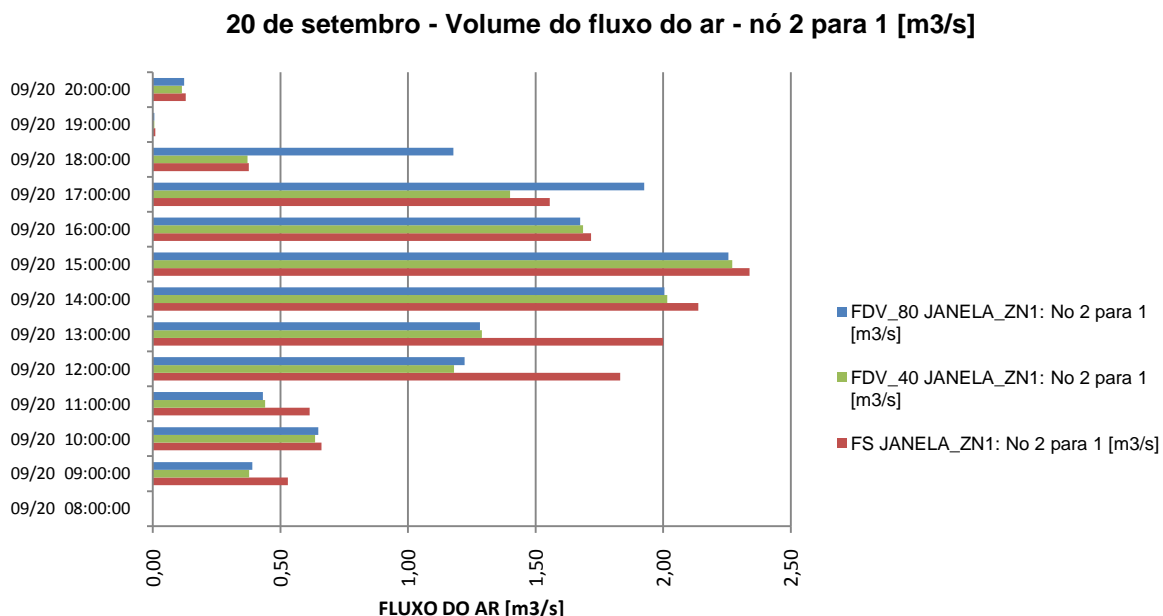


Figura 6.24 - Volume do fluxo do ar na janela da zona do escritório, de fora para dentro da zona.

O fluxo do ar do modelo FDV_40, neste sentido, na média é 15% menor que o modelo FS, enquanto o modelo FDV_80 apresenta uma redução de 5% com relação ao com fachada simples. Observa-se que a intensidade do fluxo do ar é maior que na data de 20 de março, mesmo que as médias diárias de velocidade dos ventos sejam próximas.

O terceiro aspecto a ser analisado refere-se ao comportamento do fluxo do ar nas aberturas da cavidade. O gráfico a seguir apresenta os resultados, hora a hora, considerando separadamente a abertura inferior (ABINF) e a superior (ABSUP) da pele externa da cavidade, do modelo FDV_40.

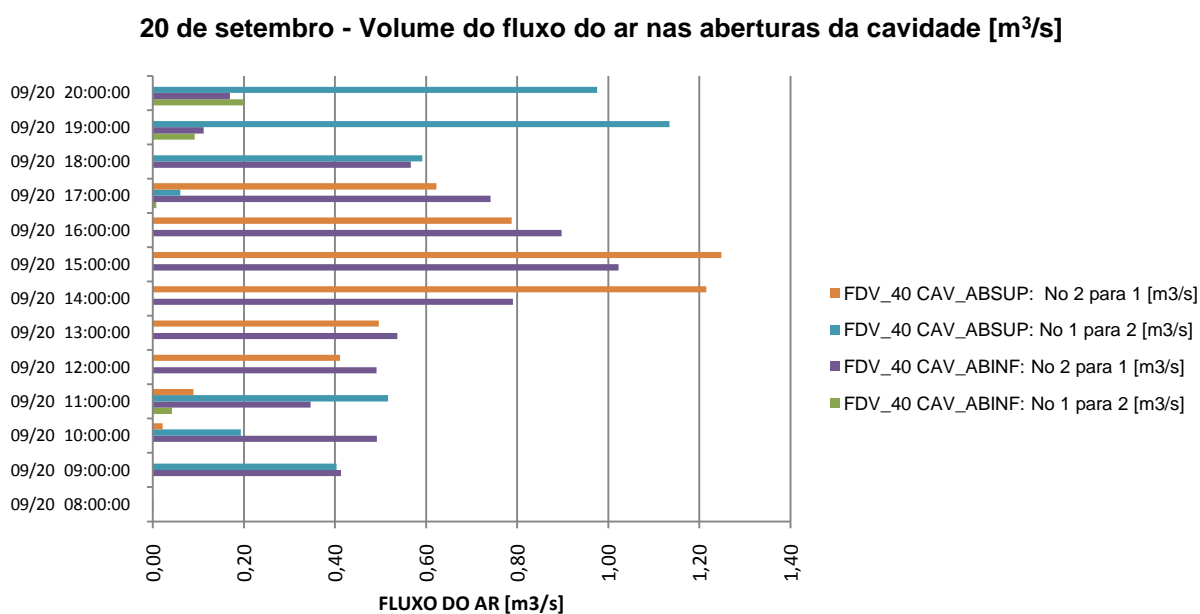


Figura 6.25 - Volume do fluxo do ar nas aberturas da cavidade – modelo FDV_40.

A partir destes resultados, é possível observar que o efeito chaminé no interior da cavidade só é significativo quando o vento não age sobre a fachada analisada. Neste dia, a ventilação dos ambientes (escritório e cavidade), se deu em sua maior parte pela ação do vento, e as duas aberturas da pele externa passam a ventilar predominantemente de fora para dentro. Já o próximo gráfico apresenta a velocidade média do ar no período analisado, na janela da zona do escritório, considerando os três modelos. A velocidade do ar, no sentido de fora para dentro, é muito mais significativa que na data anteriormente analisada. O modelo FDV_40 apresenta uma redução de 15% neste fluxo, com relação à fachada simples, apesar de um leve acréscimo no fluxo no sentido de dentro para fora, em comparação.

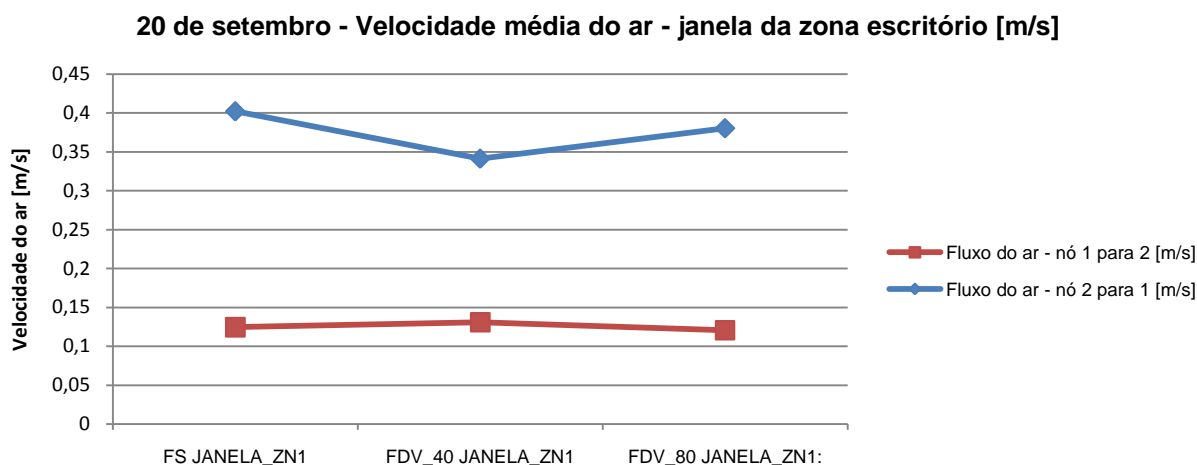


Figura 6.26 - Velocidade do ar na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.

O gráfico abaixo apresenta os fluxos do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação. Na maior parte do dia a ação da ventilação causada pelo vento, isto é, o sentido de fora para dentro do ambiente prevalece. Analisando as curvas do gráfico, observa-se ainda que tanto o modelo FS quanto o FDV_80 permitem um maior volume de fluxo que o modelo FDV_40.

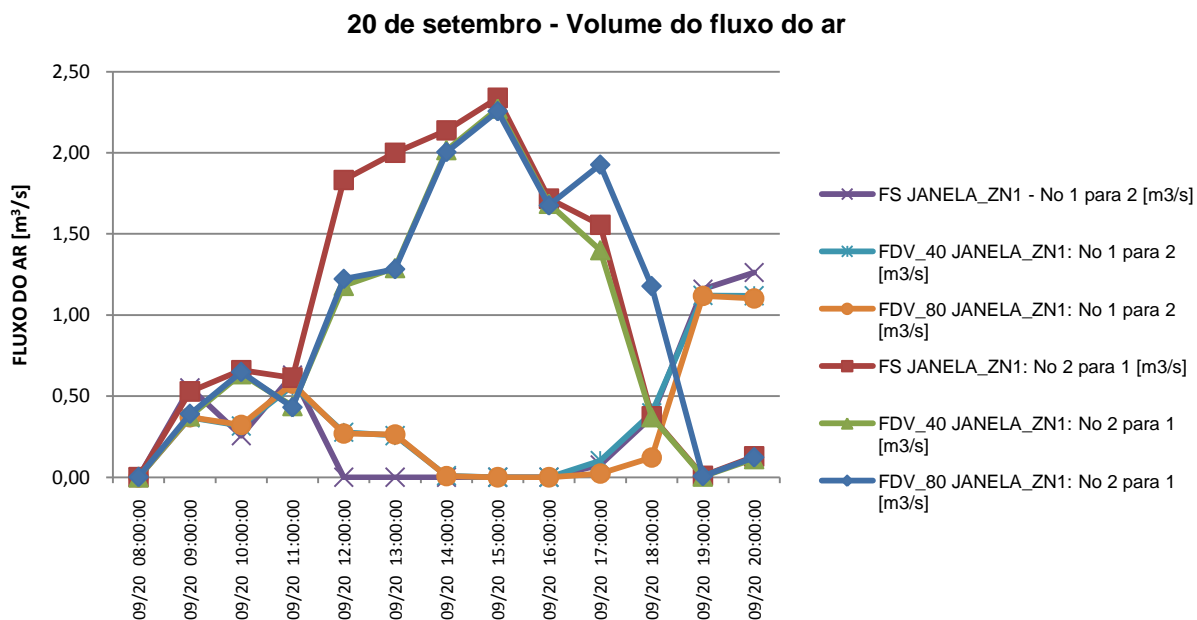


Figura 6.27 - Volume do fluxo do ar, na janela da zona do escritório, nos dois sentidos de ventilação.

6.4.5 Quinta rodada

O objetivo desta rodada é investigar a influência da orientação solar no desempenho energético das fachadas nos modelos FS e FDV_40, considerando as variáveis de resposta: taxa de aquecimento e resfriamento sensível e consumo de energia elétrica para condicionamento, na zona do escritório. Na simulação, os modelos permitem ventilação natural e também o condicionamento artificial, sem presença de proteção solar. A tabela a seguir registra os resultados obtidos do consumo de energia elétrica no ano, já corrigidos pelo coeficiente de eficiência adotado no estudo.

Nos meses de temperaturas externas maiores, no verão e primavera, os modelos com orientação leste e oeste apresentaram maior demanda de condicionamento para resfriamento que a orientação norte. O modelo FDV_40 sul apresentou o menor consumo de energia elétrica no total, em torno de 32% de redução com relação à orientação norte. Um aspecto a ser observado é a manutenção do baixo consumo de energia para aquecimento em todos os modelos, sendo o maior aumento na orientação sul, em torno de 21%. Já a orientação oeste da fachada levou a um aumento de consumo total (33%).

	Zona escritório							
	FDV_40 Norte		FDV_40 Leste		FDV_40 Sul		FDV_40 Oeste	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	49	1153	54	1354	60	756	54	1544
Total Eletricidade [kWh]	1203		1408		816		1598	
Subtotal diferença com relação a FDV_40 norte [%]			10%	17%	21%	-34%	10%	34%
Total diferença com relação a FDV_40 norte [%]			17%		-32%		33%	

Tabela 6-24 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.

O modelo FS foi simulado também em outras duas orientações solares: sul e oeste. Estas são consideradas críticas em Curitiba, por um lado pela baixa insolação durante todo o dia (orientação sul), por outro pelo excesso de insolação no período da tarde (orientação oeste). O gráfico abaixo representa estes resultados de forma a tornar mais clara a diferença de consumo anual entre modelos FDV 40 e FS.

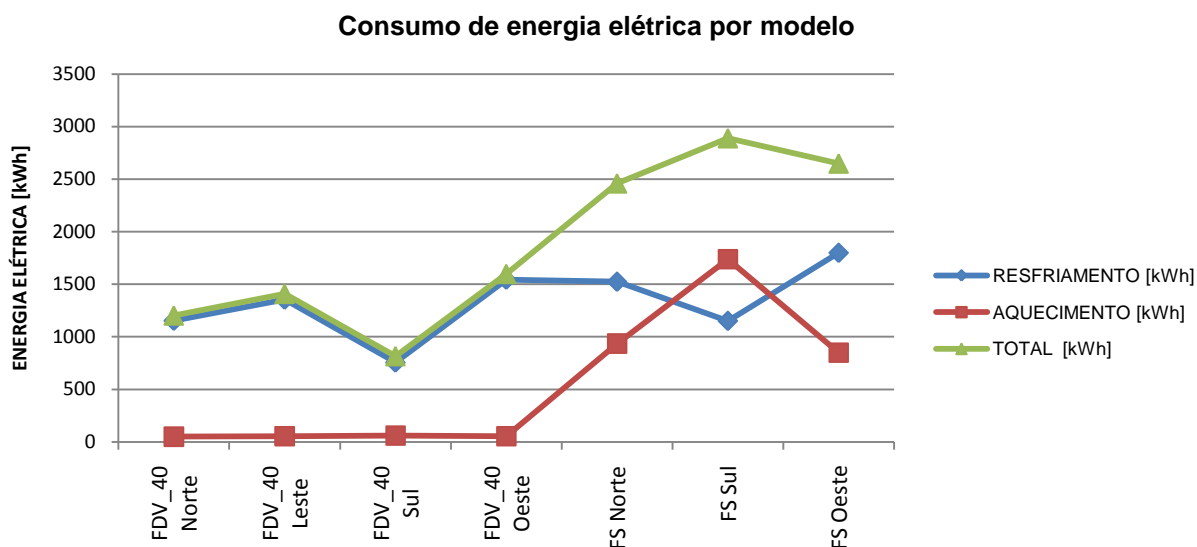


Figura 6.28 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.

O consumo de energia elétrica total dos modelos FS é maior que os modelos FDV_40, e a demanda por energia para aquecimento é a maior responsável pelo significativo aumento do consumo total.

6.4.6 Sexta rodada

O objetivo desta rodada é investigar a influência do uso de diferentes tipos de envidraçamento – vidro duplo ou vidro refletivo - no desempenho energético das fachadas nos modelos FS e FDV_40, considerando as variáveis de resposta: taxa de aquecimento e resfriamento sensível e consumo de energia elétrica para condicionamento, na zona do escritório. Na simulação, os modelos permitem ventilação natural e também o condicionamento artificial.

No modelo FDV_40, o vidro alternativo foi aplicado à pele externa ou à pele interna, a fim de investigar se há diferença entre modelos quanto à variação do posicionamento do envidraçamento duplo ou refletivo.

O uso de vidro refletivo promove a redução da demanda por condicionamento para o resfriamento. No modelo FDV_40, a aplicação na pele externa ou interna dos fechamentos envidraçados não resultou em diferenças significativas. Já quanto ao uso de vidro duplo, a aplicação na pele interna reduziu a necessidade de resfriamento do ambiente do escritório em

cerca de 30% com relação aos outros modelos. A demanda por aquecimento, com uso do vidro refletivo, é maior em todos os modelos em comparação com o uso de vidro duplo.

A tabela na sequência apresenta os resultados de consumo de energia elétrica dos diferentes modelos.

	Zona escritório											
	FS Vidro duplo		FDV_40 Vidro duplo FDV		FDV_40 Vidro duplo Interno		FS Vidro refletivo		FDV_40 Vidro refletivo FDV		FDV_40 Vidro refletivo Interno	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	797	1650	22	1590	33	1178	1110	870	77	540	33	531
Total Eletricidade [kWh]	2447		1611		1211		1980		617		564	
Subtotal diferença com relação a FS [%]			-97%	-4%	-96%	-29%			-93%	-38%	-97%	-39%
Total diferença com relação a FS [%]			-34%		-51%				-69%		-72%	

Tabela 6-25 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.

A tabela anterior apresenta as diferenças dos modelos considerando como referência a fachada simples com o mesmo tratamento de envidraçamento. Quanto ao consumo de energia elétrica dos modelos com uso de vidro duplo, a maior redução foi apresentada pelo FDV_40 com uso do vidro alternativo na pele interna, em torno de 51% no total. Já quanto ao uso de vidro refletivo, a diferença apresentada pelos modelos FDV foi maior, entre 69% (refletivo na pele externa) e 72% (refletivo na pele interna). A energia para aquecimento aumenta nos modelos com uso de vidro refletivo com relação ao vidro duplo, mais isolante.

Outra análise a ser feita é a comparação do desempenho dos modelos com vidro alternativo com os mesmos considerando as fachadas com vidros simples e transparentes. O gráfico a seguir apresenta tanto os resultados desta rodada como da segunda, a fim de verificar a vantagem do uso do envidraçamento duplo nas fachadas quanto ao desempenho energético.

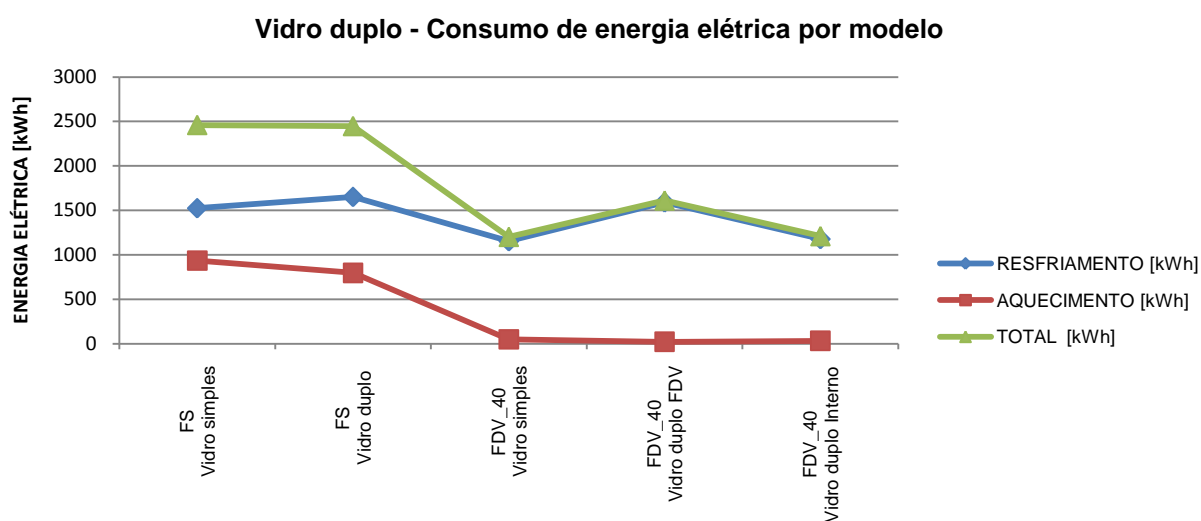


Figura 6.29 - Consumo de condicionamento dos modelos com fachada com vidro simples e vidro duplo.

Desta comparação, observa-se que o uso de vidro duplo, no fechamento externo do modelo FDV_40, resulta em aumento da demanda por resfriamento em 34% com relação ao envidraçamento simples. Já entre o modelo com vidro simples e duplo na face interna não há diferença significativa. A energia para aquecimento diminui com uso de envidraçamento duplo, em 55% (aplicação na pele externa) e 33% (aplicação na pele interna). A mesma comparação foi feita considerando o uso de vidro refletivo. O gráfico a seguir apresenta tanto os resultados desta rodada como da segunda, a fim de verificar a vantagem do uso do envidraçamento refletivo nas fachadas, quanto ao desempenho energético.

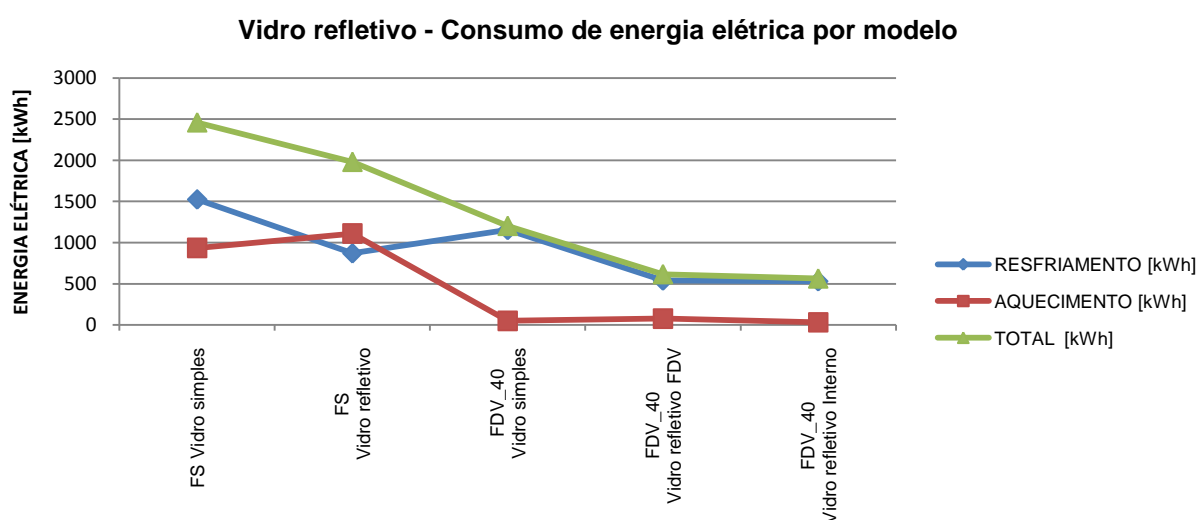


Figura 6.30 - Consumo de condicionamento dos modelos com fachada com vidro simples e vidro refletivo.

Analisando o gráfico, observa-se que o uso de vidro refletivo, nos envidraçamentos do modelo FDV_40, resulta em redução da demanda por resfriamento em 49% (aplicação na pele externa) e 53% (aplicação na pele interna) com relação ao envidraçamento simples. A energia para aquecimento diminui no modelo FDV com uso de vidro refletivo na face interna em torno de 33%.

O uso de vidro com alta reflexão, como o selecionado para este estudo, resulta em economia de energia em todos os modelos, principalmente considerando a fachada dupla ventilada. No entanto, é preciso observar que este tipo de envidraçamento leva à redução da entrada de luz visível, isto é, diminui também o aproveitamento da luz natural no ambiente e consequente aumento do uso de iluminação artificial. Este último aspecto não será abordado neste estudo.

6.4.7 Sétima rodada

Nesta rodada é investigada a influência do uso proteção solar (persianas) no desempenho energético das fachadas nos modelos FS e FDV 40, considerando as variáveis de resposta: taxa de aquecimento e resfriamento sensível e consumo de energia elétrica para condicionamento, na zona do escritório. Na simulação, os modelos permitem ventilação natural e também o condicionamento artificial. O uso de persianas será considerado para o período de necessidade por resfriamento, isto é, nos meses mais quentes.

A tabela a seguir apresenta os resultados de consumo de energia elétrica dos diferentes modelos.

	Zona escritório			
	FS Persiana		FDV_40 Persiana	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	936	891	49	679
Total Eletricidade [kWh]	1827		729	
Subtotal diferença com relação a FS [%]			-95%	-24%
Total diferença com relação a FS [%]			-60%	

Tabela 6-26 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.

O modelo FDV_40 apresentou uma redução no consumo de energia elétrica para resfriamento de 24%, com relação à fachada simples. No total, a economia de energia é de 60% na comparação dos modelos. Outra análise a ser feita é a comparação do desempenho dos modelos com uso de proteção solar com os mesmos sem uso de persiana. O gráfico a

seguir apresenta tanto os resultados desta rodada como da segunda, a fim de verificar o desempenho resultante do uso de proteção solar.

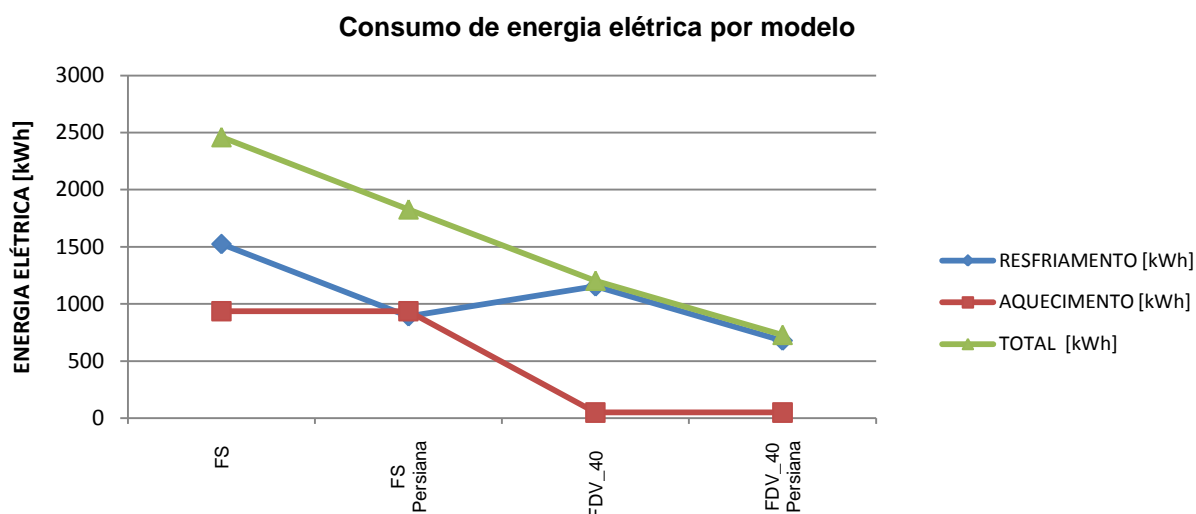


Figura 6.31 - Consumo de energia elétrica para condicionamento dos modelos com uso ou não de proteção solar.

O consumo de energia elétrica para condicionamento é 39% menor, comparando o modelo FDV-40 com uso de persiana e o sem proteção solar. As simulações foram repetidas sem uso de condicionamento artificial, a fim de verificar as temperaturas internas da zona do escritório com o uso da proteção solar (modo passivo do edifício). A análise foi feita com a contabilização das horas de temperaturas fora da faixa de 18 a 26° C. A tabela a seguir apresenta estes resultados.

Número de horas fora da faixa operação passiva 18-26°C - Zona escritório				
Modelo	FS	FS Proteção solar	FDV 40	FDV 40 Proteção solar
Horas de temperatura acima de 26°C	1072	458	1383	686
Horas de temperatura abaixo de 18°C	166	166	22	22
Total de horas fora da faixa de operação passiva	1238	624	1405	708
Diferença com relação a FS [%]			13%	-43%
Horas fora da faixa de operação passiva/ Horas de ocupação [%]	26.1%	13.2%	29.6%	14.9%
Percentual de horas acima de 26°C	22.6%	9.7%	29.1%	14.5%
Percentual de horas abaixo de 18°C	3.5%	3.5%	0.5%	0.5%
Temperatura máxima [C]	32.8	31.1	32.5	31.0
Temperatura mínima [C]	15.7	15.7	16.3	16.3

Tabela 6-27 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C - Zona escritório.

Com uso da proteção solar, o modelo FDV aumenta as horas de operação passiva para 85,1% das horas ocupadas, contra 70,4% sem o uso de persianas.

Para as simulações, optou-se por um uso de carga térmica de equipamentos que pode ser considerada alta (45 W/m² na zona do escritório). Considerando a redução desta carga para 130 *Watts* por ocupante (um valor usual em simulações), os resultados são significativamente diferentes, porém mantêm a relação entre eles. Os resultados com a redução de carga térmica são apresentados na tabela a seguir.

Número de horas fora da faixa operação passiva 18-26°C - Zona escritório				
Modelo	FS_ Proteção solar	FS_ Proteção solar + Redução C.T.	FDV 40_ Proteção solar	FDV 40_ Proteção solar + Redução C.T.
Horas de temperatura acima de 26°C	458	358	686	260
Horas de temperatura abaixo de 18°C	166	230	22	41
Total de horas fora da faixa de de operação passiva	624	588	708	301
Diferença com relação ao modelo com carga térmica maior [%]		-6%		-57%
Horas fora da faixa de operação passiva/ Horas de ocupação [%]	13.2%	12.4%	14.9%	6.3%
Percentual de horas acima de 26°C	9.7%	7.5%	14.5%	5.5%
Percentual de horas abaixo de 18°C	3.5%	4.8%	0.5%	0.9%

Tabela 6-28 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C com redução de carga térmica- Zona escritório.

Com carga térmica menor, e considerando a faixa de temperaturas adotada, os resultados tornam-se mais favoráveis para o modelo FDV_40, com redução de 57% fora da faixa de operação passiva. Há um pequeno acréscimo nas horas de frio, mas as horas de temperaturas altas passam a ser 5,5% (contra 15% da situação com cargas mais elevadas).

6.5 Discussão dos resultados

O objetivo deste capítulo foi apresentar a etapa do trabalho referente às simulações do modelo A. Este modelo caracteriza-se por ser conceitual e mais simplificado que um edifício real. Os objetivos das simulações são a análise da influência das FDV no desempenho de um ambiente de escritório, em Curitiba, e também a otimização de alguns parâmetros do sistema para uso nas simulações do modelo B. Este capítulo foi composto por uma exaustiva apresentação de resultados dos principais processos físicos relacionados ao desempenho térmico englobados pelo uso do sistema de fachadas duplas ventiladas: regime de

temperaturas internas, transferência de calor, transmissão solar e comportamento da ventilação natural no ambiente. Deve-se notar, no entanto, que os objetivos do estudo e a ferramenta escolhida para obtenção dos resultados caracterizam uma análise macroscópica do sistema de fachadas duplas ventiladas. Isto é, não se procurou entender fisicamente exatamente o que ocorre no interior da cavidade (assunto explorado na revisão bibliográfica), e sim como o uso desta tipologia de fachadas pode influenciar o desempenho térmico e energético de um ambiente de escritório, na condição climática de Curitiba.

A sala comercial simulada é baseada, quanto a suas dimensões, em edifícios existentes. No entanto, o material utilizado em seu fechamento envidraçado (vidro transparente simples, sem peitoril de alvenaria) é de baixo desempenho. Além disso, a carga térmica interna por uso de equipamentos elétricos é alta. Este modelo base foi conceituado nestas condições para tornar mais clara a influência do uso da fachada dupla ventilada em um edifício, com o intuito de maior entendimento do seu uso em Curitiba. No próximo capítulo, são apresentadas as simulações de um edifício real, e os resultados numéricos são diferentes, porém tendem a manter a relação comparativa a que se chegou com as rodadas do modelo A.

A seguir é apresentada a discussão dos resultados obtidos em cada etapa de simulações.

6.5.1 Análise comparativa das temperaturas internas da zona do escritório nos modelos FS e FDV.

A primeira rodada de simulações englobou o modelo FS e cinco modelos FDV, com variação da profundidade da cavidade de 40 a 120 centímetros, sem uso de condicionamento artificial, para analisar a influência do uso do sistema sobre as temperaturas internas da zona ocupada. Pelo estudo conduzido, conclui-se que as temperaturas do ambiente e da cavidade aumentam conforme a profundidade da mesma.

Com o aumento da profundidade da cavidade, observa-se o significativo aumento de horas com temperaturas internas altas, e uma redução nas horas de frio. É importante salientar que a carga térmica por equipamentos é elevada nestas simulações, fazendo com que os ambientes fiquem mais quentes. Ao reduzir os valores de carga térmica relacionados à ocupação (equipamentos, iluminação ou pessoas), as temperaturas internas tendem a ser

menores. Isto é, os ambientes com fachadas simples são menos quentes e mais frios que os com FDV. Com uso da proteção solar no modelo FDV, esta situação pode ser diferente.

O fato de que os modelos com FDV mantêm as temperaturas internas mais elevadas já era esperado, dado que o sistema confere maior isolamento aos fechamentos externos e menor perda de calor para o ambiente exterior. O efeito que chama a atenção é o aumento gradativo de temperaturas internas conforme a profundidade maior da cavidade. Uma explicação para este fato é que a cavidade junto à zona do escritório maior é mais quente, por ter um volume maior de acúmulo de ar aquecido pela ação solar e também uma área de exposição à ação do sol mais extensa. Na terceira rodada, na análise das perdas de calor pela janela do escritório, verificou-se que, pelo resultado das simulações, o modelo FDV de cavidade com 80 centímetros de profundidade perde menos calor o FDV_40. Isto significa que uma maior quantidade de calor (gerado pelas cargas internas e pela contribuição solar) permanece acumulada na zona do escritório no modelo com cavidade mais profunda. Para a análise mais detalhada deste aspecto e confirmação dos resultados obtidos por este estudo (quanto ao aumento da temperatura conforme a profundidade da cavidade), um estudo utilizando outro tipo de ferramenta, como softwares CFD, deverá ser realizado.

De qualquer forma, o modelo FDV com a cavidade de 40 centímetros foi escolhido como o mais adequado, por representar uma melhora significativa do desempenho no ambiente do escritório resultante do tratamento da fachada, além de usar menos material para sua execução. Com esta profundidade, ainda, a manutenção da cavidade e dos fechamentos pode ser realizada sem maiores dificuldades.

O controle da abertura das esquadrias operáveis conforme as temperaturas do ambientes internos (abertura das esquadrias a partir de 18° C e seu fechamento a 26° C) é um aspecto fundamental deste estudo para a obtenção dos resultados apresentados. Sem este controle, a adição da fachada dupla representaria apenas um ineficiente brise envidraçado (no caso das aberturas da cavidade abertas) ou um coletor solar (com as mesmas fechadas), que possivelmente levariam a resultados desfavoráveis. Este controle permite melhores condições de conforto no período de resfriamento, por não permitir que o ar superaquecido na cavidade ou no exterior entre no ambiente. Assim, quando é necessário o uso de climatização artificial, o fechamento da cavidade promove uma zona de transição isolante para o exterior, diminuindo as perdas e ganhos de calor e aumentando a eficiência do sistema. Da mesma

forma, nas horas frias, a cavidade volta a funcionar como uma zona de transição, aumentando o isolamento da fachada e melhorando tanto a ocorrência de temperaturas muito baixas como o desempenho do sistema de aquecimento.

6.5.2 Análise comparativa do consumo de energia elétrica para condicionamento da zona do escritório nos modelos FS e FDV

Quanto ao consumo de energia elétrica para climatização, a grande diferença entre o modelo com fachada simples e a dupla ventilada está na demanda por aquecimento. Com o uso de FDV, a necessidade por aquecimento é muito reduzida, resultado já esperado dado que esta é uma estratégia que se adapta a climas frios. Este aspecto do conforto, no entanto, é pouco abordado ou valorizado em Curitiba, principalmente no âmbito de edifícios de uso comercial, já que os curitibanos aceitam melhor sentir desconforto por frio do que por calor.

6.5.3 Análise comparativa da transferência de calor nos modelos FS e FDV

O uso da fachada dupla ventilada reduz a transmissão solar total para o interior do ambiente, principalmente devido à menor entrada de radiação difusa. Por ser mais protegida, a pele interna do fechamento da zona do escritório perde menos calor no modelo FDV que no FS, caracterizando o melhor isolamento conferido pela adição da cavidade ao modelo. Este dado ajuda a explicar também porque os modelos FDV demandam menor consumo de energia para condicionamento artificial. Um aspecto a ser destacado, relacionado ao conforto dos ocupantes, é a análise das temperaturas das superfícies dos fechamentos envidraçados na zona do escritório. Analisando estes resultados nas horas ocupadas de dois dias (um de calor e outro de frio), observa-se que a fachada dupla diminui a amplitude da variação da temperatura da área envidraçada, evitando que a mesma atinja valores indesejados considerando a temperatura média do ambiente.

6.5.4 Análise comparativa da ventilação natural na zona do escritório nos modelos FS e FDV

A análise do desempenho resultante do sistema de fachadas duplas ventiladas, quanto à ventilação natural, é um desafio, dado que o regime dos ventos é pouco previsível. Mesmo com a presença da cavidade, se a direção do vento age diretamente sobre a fachada, sua ação pode prevalecer sobre a ventilação cruzada, efeito considerado mais eficaz para o

funcionamento da FDV como um facilitador da exaustão do ar do interior dos ambientes. A técnica utilizada nesta pesquisa foi considerada adequada por se tratar de uma cavidade de pouca altura, do tipo *corridor facade* (segmentada por pavimentos), pouco sujeita às turbulências que podem ocorrer em cavidades contínuas ao longo da fachada. O intuito do uso da ventilação natural nas simulações, além da climatização natural, foi verificar o maior controle da velocidade do ar que entra pelas esquadrias operáveis, efeito usualmente indesejado em pavimentos de grande altura com relação ao solo, por ser desconfortável. A cavidade oferece obstáculos para que o fluxo do ar que entra pelas janelas tenha sua velocidade reduzida e mais próxima da considerada confortável. Este aspecto foi melhor desenvolvido nas simulações do modelo B. Além disto, a adição da segunda pele protege a janela do escritório das intempéries, permitindo que esta fique aberta mesmo em dias de chuvas ou ventos fortes.

6.5.5 Análise comparativa da influência da orientação solar no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV

A variação da orientação solar dos modelos também forneceu dados interessantes para análise. Em Curitiba, é consenso que a orientação norte é a ideal para ambientes de permanência, por promover menor entrada de radiação solar direta nos interiores no período do verão, e permitir a transmissão solar no inverno, enquanto a orientação sul é considerada crítica. O sistema apresenta bons resultados para a orientação norte, mas o uso do sistema de fachadas duplas mostrou-se adequado também para o sul, por reduzir a necessidade de aquecimento e resfriamento nos ambientes com relação à fachada simples. A orientação oeste, por outro lado, leva a um grande aumento do consumo de energia elétrica para condicionamento.

6.5.6 Análise comparativa da influência do uso de vidros especiais no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV

Na revisão bibliográfica foi citado um artigo sobre o benefício do uso de diferentes vidros na fachada dupla ventilada para a melhora do desempenho dos ambientes. As simulações realizadas, no entanto, chegaram a resultados diferentes do artigo pesquisado. No caso de uso de vidro duplo, o melhor posicionamento do mesmo no modelo FDV é na pele interna, que leva a maior redução da necessidade de resfriamento que com o uso do

envidraçamento duplo na pele externa. Há redução também na necessidade de aquecimento, porém o consumo total de energia para condicionamento é maior que no modelo FDV com vidro comum. Da mesma forma, o uso de vidro refletivo deve ser usado na pele interna. A redução no consumo de energia para condicionamento, nesta configuração, é significativa, porém é preciso observar que este tipo de envidraçamento leva à redução da entrada de luz visível, isto é, diminui também o aproveitamento da luz natural no ambiente e consequente aumento do uso de iluminação artificial. Além disso, existe o efeito psicológico, para os ocupantes, de ver através das janelas dias sempre iguais e escurecidos pela pouca transmissão de luz visível característica do tipo de vidro usado para as simulações. Em alguns países europeus o uso de vidros refletivos não é permitido, porque a reflexão do calor indesejado para o interior dos edifícios é devolvido para o exterior, aumentando o efeito de ilha de calor dos centros urbanos. Esta não foi considerada uma boa alternativa por esta pesquisa.

6.5.7 Análise comparativa da influência do uso de proteção solar no consumo de energia para condicionamento nos modelos FS e FDV

Uma das principais vantagens do sistema de fachadas duplas ventiladas, apontada na revisão bibliográfica, é o uso de elementos de proteção solar no interior da cavidade. Por estarem internos à fachada, no espaço intersticial, estão protegidos das intempéries. Por estarem protegidos, demandam menor manutenção, e podem ter características mais simples e serem de menor custo do que brises externos; podem ser persianas ou cortinas do tipo rolô. Estes elementos são de fácil manipulação, sendo abaixados ou recolhidos conforme a necessidade do usuário, isto é, são mais flexíveis que proteções externas, com a vantagem de barrar a radiação indesejada antes que a mesma entre no ambiente.

O uso de proteção solar, no modelo FDV, resultou em redução da demanda por condicionamento térmico artificial e promoveu o aumento das horas de operação passiva do edifício. No entanto, as horas de calor são significativamente maiores que no modelo FS. A estratégia que torna o desempenho do modelo FDV, no modo passivo, superior ao FS é a redução de carga térmica interna. No entanto, este aspecto é de difícil previsão ou controle, por esta razão optou-se por realizar as simulações com cargas térmicas internas relativamente altas neste modelo conceitual.

A seguir são apresentados os resultados das simulações do modelo B.

7. SIMULAÇÕES DO MODELO B: EDIFÍCIO COMERCIAL EXISTENTE

O modelo B representa um edifício real, situado na região central de Curitiba. As simulações do modelo B têm por objetivo a proposta de uso do sistema de fachada dupla ventilada como estratégia de *retrofitting* da fachada existente, a fim de melhorar o desempenho térmico e energético do edifício selecionado.

O modelo B, em sua configuração atual de fachada, representa o modelo de referência para comparação com o modelo B com adição da fachada dupla ventilada. Têm-se desta forma dois grupos de simulações: modelo B – FS (fachada simples, situação atual) e modelo B – FDV (fachada dupla ventilada). A FDV foi modelada com os parâmetros otimizados pelas simulações do modelo A (profundidade da cavidade, uso de ventilação natural e tipo de vidro, entre outros).

As principais variáveis de resposta investigadas nesta etapa são: temperaturas internas [C], taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] e consumo de energia elétrica [kWh].

7.1 Descrição do modelo

O **modelo B** representa um edifício existente e ocupado, situado na região central de Curitiba. Este edifício teve sua construção finalizada em 1975, projeto do arquiteto Rubens Meister, e é a sede do Instituto de Engenheiros do Paraná – IEP. Considerando seus 36 anos de existência, o *retrofitting* da fachada se justifica, já que o ciclo de vida deste elemento está entre 30 e 50 anos (REY, 2004). O edifício encontra-se, atualmente, subutilizado, com alguns pavimentos desocupados.

Quanto ao uso, têm-se ocupações distintas no edifício. O pavimento térreo é destinado a duas lojas comerciais, hall de acesso aos pavimentos superiores do edifício e estacionamento. O segundo andar constitui-se de uma sala para exposições, foyer e um ambiente para eventos. O terceiro abriga a administração do IEP e o auditório. A partir do quarto pavimento, até o décimo quinto, são os pavimentos tipo com planta livre, para uso de escritório. Alguns destes pavimentos são destinados para aluguel por terceiros. O décimo sexto pavimento destina-se ao espaço de confraternização e eventos promovidos pelo IEP.

Para os objetivos desta pesquisa, serão analisados três pavimentos tipo do edifício: 5º, 9º e 15º pavimentos. Os pavimentos do embasamento, assim como o 16º, não serão estudados. Isto é justificado porque não se pretende determinar o consumo de energia elétrica do edifício como um todo, e sim verificar se o sistema de fachada dupla ventilada será adequado para a melhora do desempenho dos ambientes destinados ao trabalho.

7.1.1 Implantação e contexto urbano

O edifício foi implantado em um terreno com a testada frontal mais estreita, e de grande profundidade. Desta forma, as fachadas principais estão ao longo das divisas laterais, sendo que a fachada frontal e a posterior não possuem aberturas. A orientação solar das fachadas longitudinais é 45° com relação ao norte (FIGURA 7.1).

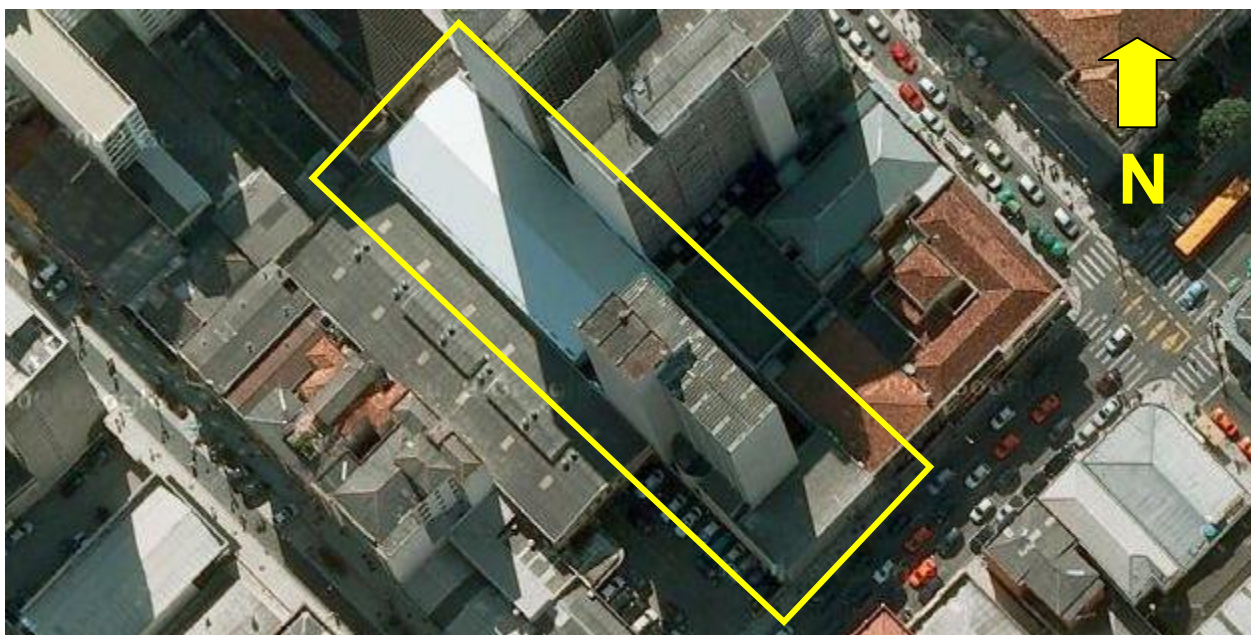


Figura 7.1 - Vista aérea da implantação do edifício. Fonte: GoogleMaps. Acesso: 10/03/2011

As edificações no entorno são baixas, em sua maioria, de forma que há pouca interferência na insolação recebida pelo edifício estudado, em seus pavimentos de escritórios.

Em visita ao edifício, ocupantes atuais relataram que, nos pavimentos tipo, a incidência solar é alta. Pela manhã, os ocupantes situados junto à fachada sudoeste relatam que o ambiente, em sua percepção, fica muito frio. Por outro lado, no período da tarde, a sensação é de muito calor. O edifício, atualmente, não possui proteções solares externas (tipo

brise), e apenas cortinas ou persianas verticais são usadas para barrar a incidência solar direta. Este tipo de solução prejudica a ventilação natural do pavimento, aumentando o problema do calor localizado.

7.1.2 Características construtivas do edifício

O edifício é composto de 16 andares, sendo que destes 12 são iguais, isto é, constituem os pavimentos tipo para uso de escritórios. Para as simulações, os pavimentos foram considerados de planta livre, sem salas fechadas com divisórias, a fim de permitir a ventilação cruzada entre fachadas opostas (FIGURA 7.2). O banheiro individual também foi retirado, já que existem duas instalações sanitárias com acesso pela circulação comum.

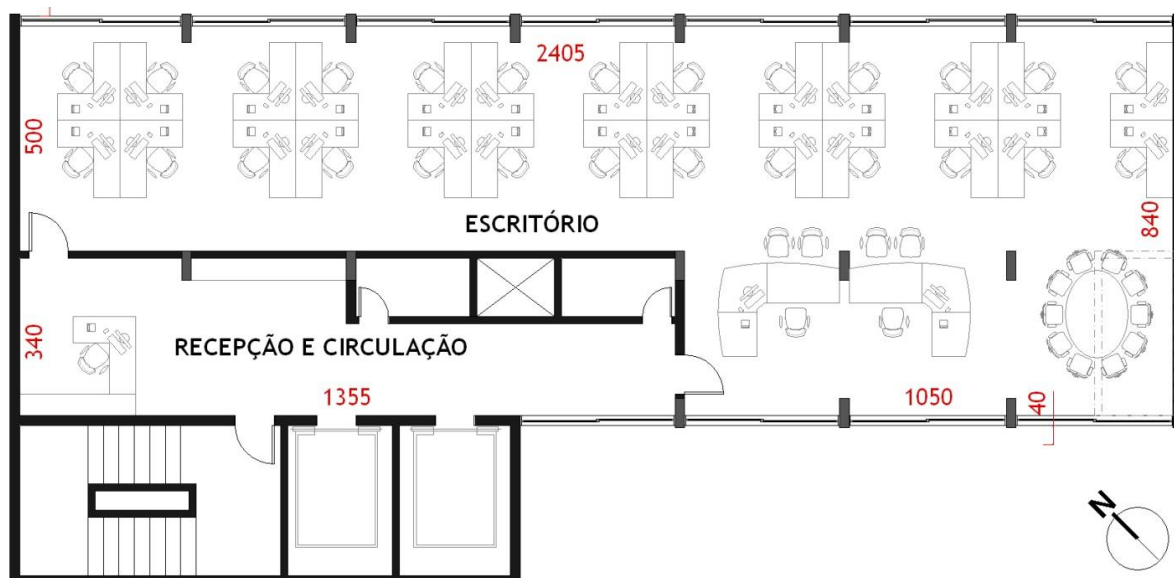


Figura 7.2 - Planta do pavimento tipo – proposta de layout.

Por se tratar de um *retrofitting*, o layout do pavimento em planta livre é uma das propostas deste estudo. Sendo necessárias, as salas individuais que forem criadas, na reocupação do edifício, devem manter ter aberturas de forma que a ventilação cruzada possa ocorrer entre fachadas. Esta condição é fundamental para garantir a melhoria do desempenho do edifício.

O pé-direito existente, medido do piso à face inferior da laje, é de 2,80 metros, considerado baixo para o padrão de ocupação de escritórios. Desta forma, outra recomendação deste estudo é que não seja utilizado forro nos ambientes de trabalho, a fim de melhorar o desempenho térmico e as condições de conforto pela maior exposição da massa

térmica do concreto da laje²⁴. O edifício não possui sistema de condicionamento artificial central. Os aparelhos existentes são do tipo individual, de janela ou *split*.

O edifício tem as características construtivas como descrito abaixo:

- Área do ambiente de escritório: 156,40 m².
- Área da recepção, circulação, elevadores e escada: 80,90 m².
- Pé-direito: 2,80 m, não considerando uso de forro.
- Materiais dos elementos construtivos:
 - Paredes: alvenaria de blocos cerâmicos com 0,15 metros de espessura.
 - Laje de piso e de teto: concreto, com 0,20 metros de espessura.
 - Fachada: o *WWR*²⁵ das fachadas principais do escritório, a nordeste e a sudoeste, é igual a 62%. As esquadrias são do tipo deslizante ou de correr com duas folhas, o vidro é incolor e transparente.



Figura 7.3 - Vista da fachada nordeste e sudoeste do edifício.

²⁴ Como o material concreto tem grande massa térmica, acumula os ganhos de calor gerados pela ocupação e devolve para o ambiente com atraso, no período não ocupado, por exemplo, diferente de forros com características isolantes. O uso de ventilação noturna torna este efeito ainda mais vantajoso.

²⁵ *WWR* (*window to wall ratio*): proporção de panos envidraçados com relação às vedações opacas.

7.1.3 Fachada dupla ventilada

O modelo do edifício com fachada dupla ventilada tem a mesma configuração do modelo B – FS, com acréscimo da segunda pele envidraçada para configurar a cavidade. A cavidade compreende toda a fachada sudoeste e nordeste dos pavimentos tipo, no ambiente do escritório. Estas são segmentadas por pavimento (tipo *corridor façade*) por lajes em concreto. A cavidade possui 40 centímetros de profundidade. As figuras 7.5 e 7.6 representam a fachada dupla ventilada proposta.

Uma vantagem do uso da FDV para este edifício diz respeito à altura do peitoril existente das janelas, de apenas 50 centímetros. Como as normas federais estipulam que o peitoril mínimo para pavimentos em maior altura variam de 105 a 120 centímetros, atualmente existem barras horizontais de alumínio para proteção dos ocupantes, as quais não contribuem favoravelmente para a estética do edifício e ainda não atendem completamente às normas. Com a FDV, é possível eliminar este guarda-corpo, e deixar a plástica do edifício mais limpa, aumentando a segurança.

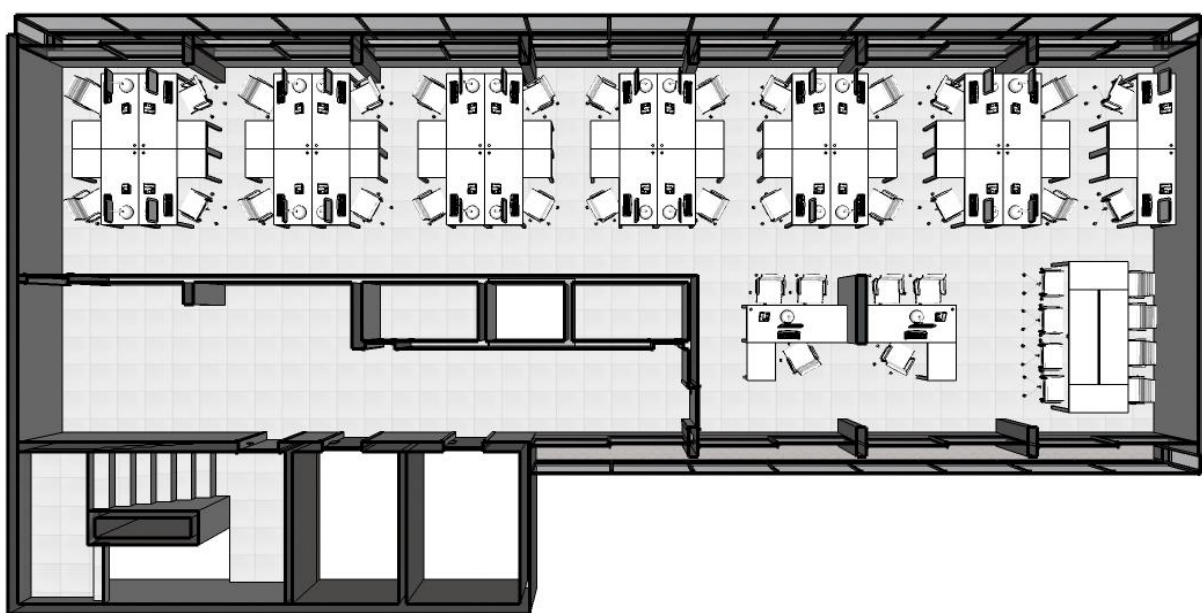


Figura 7.4 - Pavimento tipo com acréscimo da fachada dupla ventilada – planta.

Foram propostas duas aberturas de ventilação da cavidade, uma inferior, na altura do parapeito existente, e outra superior, junto à divisão entre módulos de FDV. Ambas são pivotantes do tipo horizontal. Internamente, há previsão de proteção solar escamoteável para proteção solar, no módulo central fixo da pele externa.



Figura 7.5 - Pavimento tipo com acréscimo da fachada dupla ventilada – corte.

A figura a seguir mostra em mais detalhe a fachada dupla proposta para o edifício, com indicação de seus componentes.

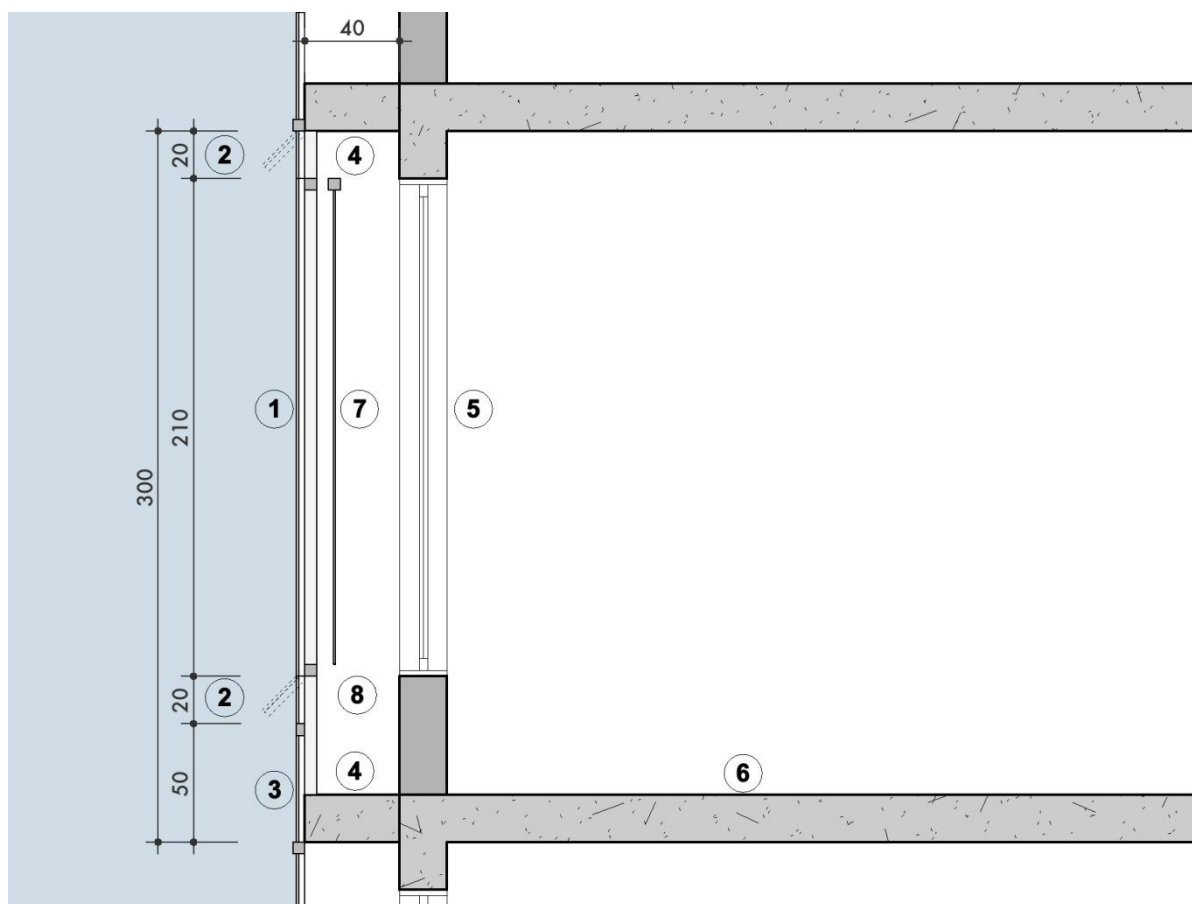


Figura 7.6 - Módulo da fachada dupla ventilada proposta – corte parcial.

1 – Fechamento em vidro temperado. 2 – Aberturas para ventilação da FDV. 3 – Fechamento em vidro opaco. 4 – Laje de concreto. 5 – Esquadria existente. 6 – Escritório. 7 – Persiana. 8 – Cavidade.

Para o fechamento envidraçado, foram utilizados dois tipos de vidro: vidro transparente e vidro opaco (com baixa transmissão da luz visível). A figura a seguir representa uma elevação parcial do fechamento envidraçado da fachada dupla ventilada, com as áreas de envidraçamento transparente e opaco. A opção por usar faixas de vidro opaco tem dois motivos: o primeiro diz respeito à solução plástica da fachada (as faixas de vidro opaco correspondem à parte de alvenaria ou de estrutura da fachada existente); o outro procura promover o melhor desempenho da fachada ao diminuir a entrada do calor solar na cavidade.

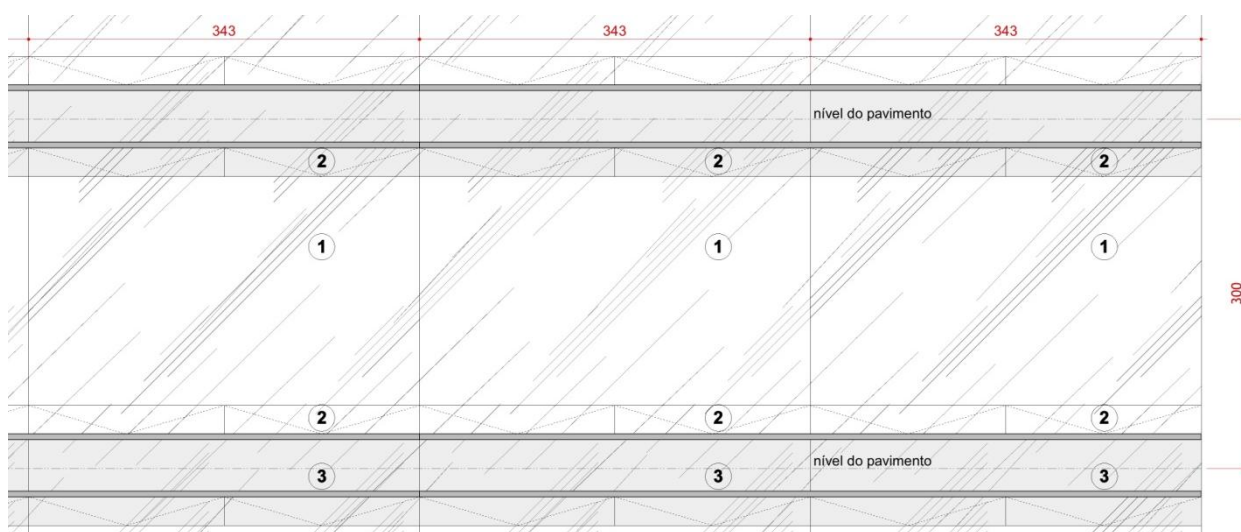


Figura 7.7 - Módulo da fachada dupla ventilada proposta – elevação parcial.

1 – Fechamento em vidro transparente. 2 – Aberturas para ventilação da FDV. 3 – Fechamento em vidro opaco.



Figura 7.8 - Visão parcial da fachada nordeste com acréscimo da FDV.

A seguir serão descritos os procedimentos de modelagem do edifício no programa de simulações.

7.2 Descrição das simulações

7.2.1 Zonas térmicas

a) Para as simulações foram consideradas as zonas térmicas descritas a seguir (FIGURA 7.90):

- Zona do escritório: é a zona usada como referência para a análise das temperaturas e demanda por condicionamento artificial. Conecta-se com o exterior ou com a zona da cavidade, no caso do modelo B – FDV, e com a zona da recepção. As características da ocupação e geração de carga térmica são listadas a seguir.
 - Ocupação do ambiente de escritório: 28 pessoas, conforme layout desenvolvido para este estudo.
 - Equipamentos elétricos: computadores, monitores, impressoras e outros equipamentos de apoio ao uso do escritório.
 - Iluminação: luminárias para fluorescentes tubulares.

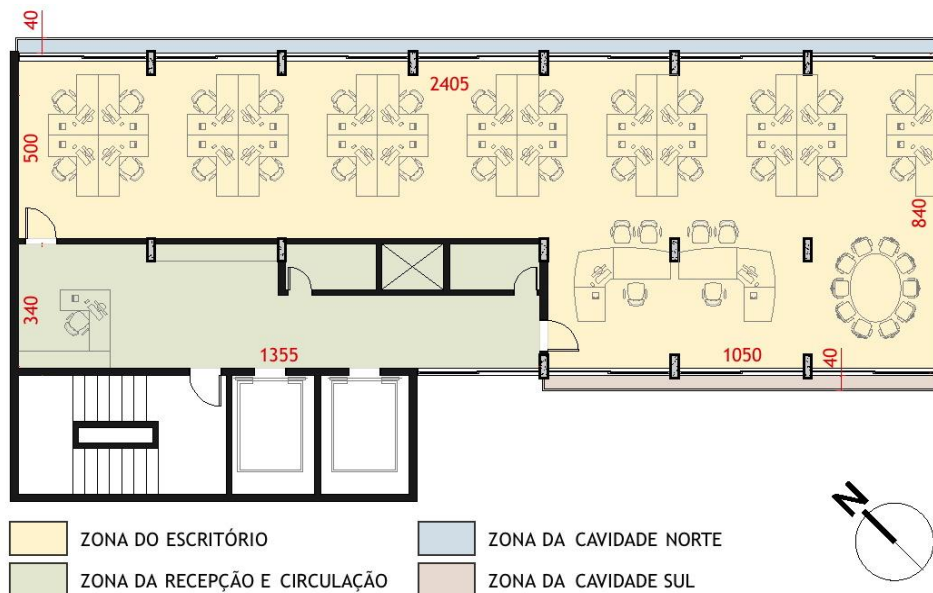


Figura 7.9 - Distribuição das zonas térmicas utilizadas nas simulações.

- Zona da recepção e circulação: inclui as instalações sanitárias, o corredor e a recepção. Conecta-se ao escritório e ao exterior. O volume da circulação vertical não foi incluído nas simulações. As características da ocupação e geração de carga térmica são listadas a seguir.
 - Ocupação da recepção: 1 pessoa.
 - Equipamentos elétricos: computadores, monitores, impressoras e outros equipamentos de apoio ao uso do escritório.
 - Iluminação: luminárias para fluorescentes tubulares.
- Zonas das cavidades: presente apenas no modelo B – FDV. Não tem geração de calor por ocupação. Conecta-se com o exterior e a zona do escritório, configurando uma zona de transição térmica.

7.2.2 Materiais e elementos construtivos

As propriedades dos materiais de construção utilizados nas simulações estão listadas na tabela a seguir.

Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo B - FS e FDV							
ELEMENTO CONSTRUTIVO	COMPOSIÇÃO DO ELEMENTO	RUGOSIDADE	ESP. (m)	CONDUTIVIDADE [W/m-K]	DENSIDADE [kg/m ³]	CALOR ESPECÍFICO [J/kg-K]	RESISTÊNCIA TÉRMICA [m ² -K/W]
Parede de alvenaria Esp.= 15 cm	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	1000	
	Tijolo 6 furos circ*	Média	0.1	0.9	1232	920	
	Câmara de ar fluxo horizontal*		0.02 a 0.05				0.16
	Tijolo 6 furos circ*	Média	0.1	0.9	1232	1000	
	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	920	
Laje de piso e teto	Concreto*	Rugoso	0.2	1.75	2200	1000	
	Argamassa*	Média	0.025	1.15	1800	1000	
	Cerâmica*	Rugoso	0.01	0.9	1600	920	
Porta	Madeira*	Média		0.29	800	1340	

* (ORDENES *et al*, 2003)

Tabela 7-1 - Tabela de materiais utilizados nas simulações do Modelo B - FS e FDV

As propriedades dos vidros foram definidas a partir da biblioteca de exemplos do próprio *Energy Plus*, e estão listadas a seguir:

Tipo de vidro	U-Factor [W/m ² -K]	SHGC	Transmitância visível
Vidro transparente - CLEAR 3mm*	5.778	0.819	0.881
Vidro opaco - 6mm*	5.778	0.328	0.128
Vidro temperado transparente - CLEAR 12mm*	5.558	0.737	0.841
Vidro transparente seletivo de baixa emissividade - 6mm*	5.64	0.483	0.771

Tabela 7-2 - Tabela de vidros utilizados nas simulações do Modelo A - FS e FDV

No modelo FDV, a faixa de vidro incolor será simulada com dois tipos de vidro: temperado com 12 milímetros e seletivo de baixa emissividade com 6 milímetros de espessura.

7.2.3 Cargas térmicas e rotinas de funcionamento

Foram considerados, como geração de calor interno, as pessoas, os equipamentos elétricos e a iluminação. Estas cargas térmicas não se baseiam na ocupação atual, mas na projeção de ocupação máxima considerada para este estudo. Para os equipamentos elétricos, foi utilizado um valor menor que nas simulações do modelo A.

A tabela abaixo apresenta as cargas térmicas utilizadas.

CARGAS TÉRMICAS INTERNAS					
PESSOAS		ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL		EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	
NÚMERO DE OCUPANTES	28	WATTS POR ÁREA DE PISO DA ZONA	12 W/m ² *	WATTS POR ÁREA DE PISO DA ZONA	150 W/pessoa**
SCHEDULE	Ocupação	SCHEDULE	Iluminação	SCHEDULE	Equipamentos

* Valores baseados em Pirró e Romero, 2006

** Valores baseados em Melo e Barcelos, 2010

Tabela 7-3 - Cargas térmicas utilizadas nas simulações

O valor de carga térmica relacionado a cada ocupante é de 90 W, ou seja, atividade de baixa intensidade.

As rotinas (*schedules*) de funcionamento inseridas no programa estão listadas abaixo. Foram definidas *schedules* para o período de ocupação, as cargas térmicas, ventilação natural (disponibilidade e controle de temperatura), condicionamento artificial e proteção solar. O funcionamento das esquadrias operáveis é controlado no programa por temperatura, isto é, foi fixado um valor mínimo de temperatura interna, para abertura das esquadrias, e um valor máximo para fechamento das mesmas. O delta de variação para funcionamento da ventilação natural é de 18° C para abertura e 26° C para fechamento.

São as rotinas definidas para este grupo de simulações:

· Ocupação:	· Iluminação:	· Equipamentos:
o Período: dias da semana. o Horários: Das 8h00 às 12h00: 100% de ocupação. Das 12h00 às 14h00: 50% de ocupação. Das 14h00 às 18h00: 100% de ocupação. Das 18h00 às 20h00: 25% de ocupação	o Período: dias da semana. o Horários: Das 8h00 às 12h00: 100% de uso. Das 12h00 às 14h00: 50% de uso. Das 14h00 às 18h00: 100% de uso. Das 18h00 às 8h00: 25% de uso. Período: finais de semana e feriados: 25% de uso.	o Período: dias da semana. o Horários: Das 8h00 às 18h00: 100% de uso. Das 18h00 às 20h00: 25% de uso.
· Ventilação:	· HVAC:	
Período: todos os dias. Horários: Das 8h00 às 20h00: 100% de disponibilidade. Controle: Das 8h00 às 20h00: 100% de disponibilidade. Temperatura mínima para abertura das esquadrias: 18° C. Temperatura máxima para fechamento das esquadrias: 26° C.	o Período: todos os dias. o Horários: Das 8h00 às 20h00: 100% de disponibilidade	

Tabela 7-4 - Rotinas de funcionamento utilizadas nas simulações.

O controle de temperatura para a ventilação demandará, para o bom funcionamento, automatização das aberturas da fachada dupla. Este controle é importante para promover a manutenção das temperaturas mais confortáveis no inverno, e também evitar que o ar aquecido da cavidade acima da faixa de conforto seja insuflado para o interior dos ambientes. Na prática, estas esquadrias podem ser abertas por braços pneumáticos, acionados conforme a faixa de temperatura estabelecida. A figura 7.10 mostra uma situação real de esquadria automatizada.



Figura 7.10 - Fachada dupla ventilada do edifício SME, em Kassel, Alemanha. FONTE: Aloísio Leoni Schmid, 2011.

7.2.4 Configuração das aberturas para ventilação natural e controles de temperatura

As janelas existentes da zona do escritório possuem área para iluminação natural correspondente 40% da área do piso, (FIGURA 7.11). O funcionamento das mesmas é deslizante ou de correr, com abertura de 50% do vão para ventilação. Já as aberturas da fachada dupla abrangem 15% da área envidraçada frontal.

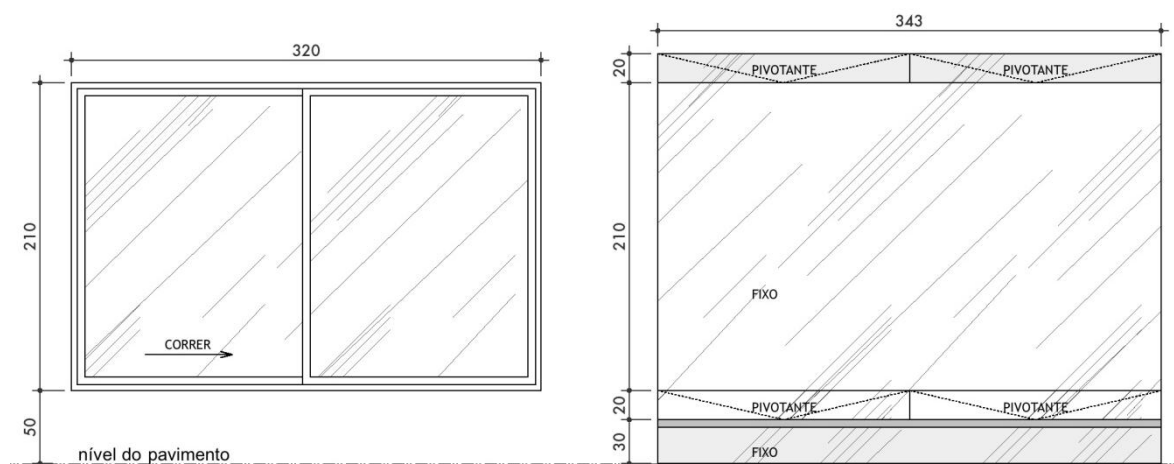


Figura 7.11 - Dimensões e funcionamento da janela do escritório (à esquerda) e as aberturas da FDV (à direita).

A zona do escritório tem dez janelas com dimensões de 3,20 por 2,10 metros, com peitoril de 50 centímetros. A FDV também foi projetada com dez módulos, iguais ao desenho da figura acima, com aberturas pivotantes inferiores e superiores. Como as janelas e a fachada dupla se encontram em fachadas opostas, a ação da ventilação cruzada é possível. A porta de acesso ao escritório e a janela da zona da recepção também foram modeladas de forma a permitir a ventilação. No programa, as aberturas foram configuradas da mesma forma que nas simulações do modelo A.

7.2.5 Configuração do condicionamento artificial

Como o edifício estudado, originalmente, não foi projetado de forma a considerar o uso de condicionamento artificial, considerou-se o uso de unidades do tipo *split* como o sistema de mais fácil implantação no *retrofitting* da edificação. A partir dos relatos dos ocupantes, observou-se que, na situação atual, os escritórios apresentam condições de conforto insatisfatórias. Desta forma, e a fim de estabelecer comparações com a utilização do sistema de FDV, o modelo FS também será simulado com acréscimo de condicionamento

artificial. A modelagem do sistema de condicionamento artificial foi feita da mesma forma que nas simulações do modelo A. A zona do escritório é o único ambiente condicionado artificialmente.

7.2.6 Configuração da proteção solar

O uso de proteção solar será importante para a manutenção do conforto na zona do escritório, já que, devido à orientação solar do edifício, a entrada de radiação solar no ambiente é alta. Foram escolhidas cortinas do tipo rolo, com alta refletividade, que permitem o recolhimento total quando não forem desejadas. O acionamento das cortinas deve ser manual, para que os ocupantes possam ter o controle sobre o seu funcionamento. Nas simulações, a presença das cortinas foi considerada constante, para os períodos de maior calor. A proteção solar é posicionada no interior da cavidade, nos modelos FDV, e no interior do ambiente, no modelo FS.

A escolha deste tipo de proteção, em vez de persianas, se dá pela orientação do edifício. Com o sol em altura mais baixa (quando o mesmo se aproxima do leste e do oeste), o espaço entre as lâminas da persiana tendem a deixar passar parte da radiação solar indesejada. Assim, um elemento com maior opacidade foi considerado mais adequado. As cortinas tipo rolô foram modeladas seguindo os passos descritos nas simulações do modelo A. No modelo B - FDV, a cortina encontra-se junto aos vidros da fachada dupla, no interior da cavidade, distantes 10 centímetros do vidro.

7.3 Planejamento das simulações

O número total de simulações realizadas para o modelo B é menor que no A, já que o sistema já passou pelo processo de otimização na etapa anterior.

O modelo B - FDV foi inserido no programa com a profundidade de cavidade considerada mais adequada (40 centímetros de profundidade), uso de proteção solar, condicionamento artificial e dimensionamento das aberturas da fachada dupla.

A única variação introduzida nesta sequência de simulações foi a variação do tipo de vidro, com uso de vidro opaco na altura do parapeito e da viga da fachada existente, constante nos modelos, e uso de vidro seletivo de baixa emissividade com alternativa ao vidro

transparente, na fachada dupla. Nas simulações do modelo A, o uso de vidro duplo foi descartado, por não apresentar redução significativa no consumo de energia para condicionamento.

As simulações são distribuídas de forma a estabelecer dois cenários para a análise do desempenho da zona do escritório, tanto na situação atual como no acréscimo da fachada dupla ventilada:

- Cenário 1: determinação do uso de condicionamento artificial. Nestas simulações, o modelo permite ventilação natural e/ou uso de proteção solar, mas quando as condições de temperatura interna estiverem fora da faixa definida pelo termostato programado (18 a 24° C), o sistema de condicionamento será acionado.
- Cenário 2: verificação do comportamento térmico (baseado principalmente da medida das temperaturas internas) no modo passivo, isto é, sem uso de condicionamento artificial. Nestas simulações, o modelo utiliza de ventilação natural, uso de proteção solar, ventilação noturna da cavidade e/ou vidro seletivo.

Cada rodada de simulações apresentada corresponde a uma variação dos modelos e/ou verificação de diferentes variáveis de resposta. No cenário 1, o modelo foi simulado em três níveis, o pavimento tipo mediano (pavimento 9), um tipo mais baixo (pavimento 5) e o mais alto (pavimento 15). As primeiras quatro rodadas foram realizadas para o nono pavimento. A primeira foi realizada para o modelo FS e FDV sem proteção solar. A segunda rodada considera o acréscimo de proteção solar e ventilação noturna ao modelo. A terceira rodada abrange o modelo FDV com a substituição do vidro temperado transparente, na fachada dupla, por vidro seletivo com baixa emissividade. A quarta rodada simula a alternativa com vidro alternativo e com acréscimo da proteção solar. As simulações foram repetidas para o quinto e décimo quinto pavimentos, com a mesma configuração da primeira rodada. Desta forma, é possível analisar se há diferença no desempenho com a variação da altura do pavimento. Estas simulações consideram o modelo no cenário 1, e estão representadas esquematicamente na tabela a seguir.

1ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FS FDV	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento artificial • Ventilação natural quando possível • Vidro simples e comum 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] • Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento 	9
2ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FDV	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento artificial • Ventilação natural quando possível • Ventilação noturna da cavidade • Proteção solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] • Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento 	9
3ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FDV	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento artificial • Ventilação natural quando possível • Vidro seletivo de baixa emissividade 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] • Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento 	9
4ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FDV	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento artificial • Ventilação natural quando possível • Vidro seletivo de baixa emissividade • Proteção solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] • Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento 	9
5ª RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FS FDV	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento artificial • Ventilação natural quando possível • Vidro simples e comum 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] • Consumo de energia elétrica [kWh] para condicionamento 	5 e 15

Tabela 7-5 - Planejamento das rodadas de simulações no cenário 1.

No cenário 2, os modelos foram simulados correspondendo ao nono pavimento. A sexta rodada pretende verificar o comportamento da ventilação natural, comparando o modelo FS e FDV, à semelhança da análise feita nas simulações do modelo A. A sétima rodada foi realizada para o modelo FS e FDV com e sem proteção solar, no cenário passivo, com objetivo de analisar as temperaturas internas no período de ocupação. Como os mesmos objetivos, mas com variação do tipo de vidro e ação de ventilação noturna na FDV, foram realizadas as oitava e nona rodadas.

O acréscimo de proteção solar se dá sempre da mesma maneira: a cortina é posicionada, no modelo FDV, junto à pele externa na zona da cavidade, na altura do módulo fixo central de vidro transparente. No modelo FS a cortina fica interna à zona do escritório, nas janelas das duas fachadas. É importante notar que o uso de cortinas com a fachada simples prejudica o efeito da ventilação natural, dado que o programa de simulação não

consegue reproduzir, o que não acontece no modelo com a fachada dupla ventilada, já que as aberturas da pele externa estão abaixo e acima da posição da cortina. Outro aspecto diz respeito ao tipo de cortina utilizada nas simulações do FS. Para reproduzir mais fielmente a situação atual, a proteção solar simulada tem um índice de refletância menor que a proposta para a FDV.

6º RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FS	• Ventilação natural	• Volume do fluxo de ar [m ³ /s]	9
	FDV	• Vidro simples e comum		
7º RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FS	• Ventilação natural	• Temperaturas internas • Horas ocupadas na faixa de operação passiva	9
	FDV	• Vidro simples e comum • Proteção solar		
8º RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FDV	• Ventilação natural • Ventilação noturna da FDV • Proteção solar	• Temperaturas internas • Horas ocupadas na faixa de operação passiva	9
9º RODADA DE SIMULAÇÕES	MODELOS	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	PAV.
	FDV	• Ventilação natural • Vidro seletivo de baixa emissividade	• Temperaturas internas • Horas ocupadas na faixa de operação passiva	9

Tabela 7-6- Planejamento das rodadas de simulações no cenário 2

Uma última rodada foi realizada alterando a orientação do edifício. Na análise do modelo A, verificou-se que a orientação com melhor desempenho foi a norte-sul. Esta será simulada também, apenas como um dado para comparação.

7.4 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das rodadas de simulações executadas para o modelo B, de acordo com o planejamento apresentado na tabela 5.

7.4.1 Primeira, segunda, terceira e quarta rodadas

O objetivo destas rodadas é analisar comparativamente o consumo de condicionamento para a zona de escritório dos modelos com FS e FDV. As variáveis de resposta são: taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] e energia elétrica [kWh] para

condicionamento. Nestas rodadas, foram variados os fatores tipo de vidro e presença de proteção solar, como descrito a seguir:

- 1ª rodada: abrange os modelos FS e FDV, com ventilação natural quando possível, condicionamento artificial e vidro comum.
- 2ª rodada: abrange o modelo FDV, com ventilação natural quando possível, condicionamento artificial, vidro comum, ventilação noturna e proteção solar.
- 3ª rodada: abrange o modelo FDV, com ventilação natural quando possível, condicionamento artificial e vidro seletivo de baixa emissividade.
- 4ª rodada: abrange o modelo FDV, com ventilação natural quando possível, condicionamento artificial, vidro seletivo de baixa emissividade e proteção solar.

A tabela a seguir registra os resultados do consumo de energia elétrica para condicionamento dos diferentes modelos, considerando o ano inteiro.

	Zona escritório									
	FS		FDV		FDV + Proteção solar + Ventilação noturna		FDV + Vidro seletivo		FDV + Vidro seletivo + Prot. Solar	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	6488	4092	625	3748	625	2374	639	2572	829	2944
Total Eletricidade [kWh]	10580		4373		2999		3210		3773	
Subtotal diferença com relação à FS [%]			-90%	-8%	-90%	-42%	-90%	-37%	-87%	-28%
Total diferença com relação à FS [%]			-59%		-72%		-70%		-64%	

Tabela 7-7 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos.

Os modelos FDV apresentaram uma grande redução do consumo para aquecimento com relação ao FS. Para resfriamento, no modelo FDV com vidro comum e sem uso de proteção solar, a energia utilizada é 8% menor que a fachada simples, e 42% a menos com uso de proteção solar e ventilação noturna da cavidade. No modelo com vidro seletivo, o consumo para resfriamento reduz em 37% e 28% (com cortina), respectivamente, comparando com o FS. Apesar das simulações não apresentarem uma melhora no consumo de energia elétrica, no caso de uso de vidro especial em conjunto com a cortina, a utilização da proteção solar é considerada importante, para maior controle da incidência de radiação direta no ambiente de escritório.

O gráfico a seguir apresenta estes resultados de forma a tornar de mais fácil visualização a diferença de consumo entre modelos.

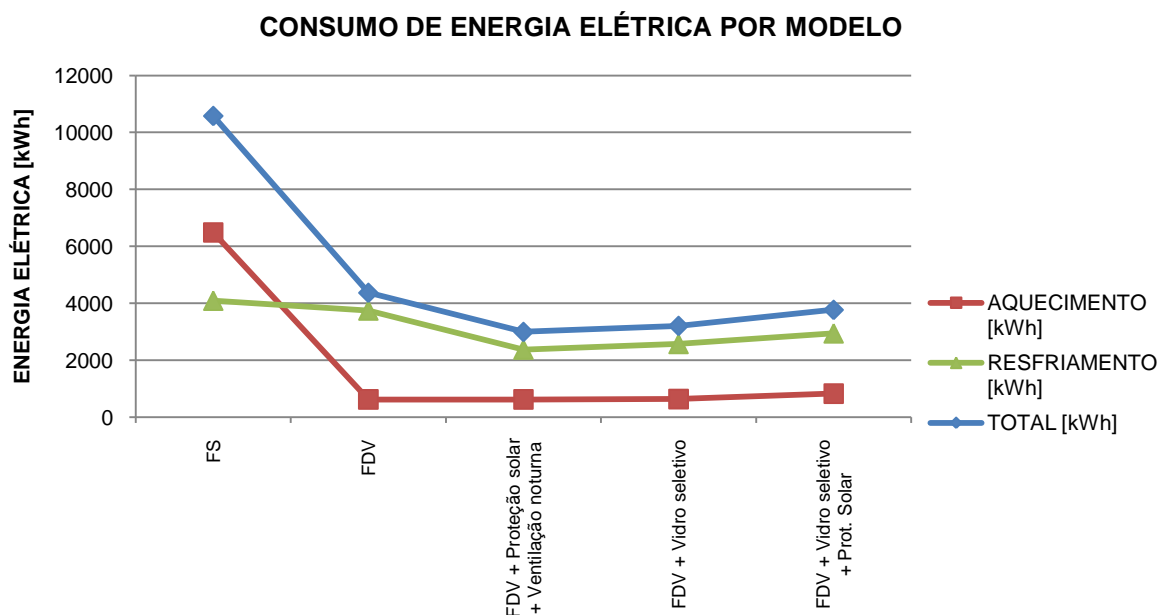


Figura 7.12 - Gráfico do consumo de energia elétrica por modelo.

Outro resultado a ser analisado são as horas em que a zona do escritório necessita de condicionamento artificial nos diferentes modelos. Foram considerados os modelos FS, FDV e FDV com vidro seletivo, todos sem acréscimo de proteção solar. A temperatura de *setpoint* para o uso de condicionamento artificial é 18° C, para o frio, e 24° C, para o calor. A tabela abaixo registra estes resultados.

Número de horas de condicionamento artificial_Ano				
Modelo	FS	FDV	FDV + prot. solar + vent. noturna	FDV + vidro seletivo
Aquecimento	842	391	391	441
Resfriamento	1567	1320	1082	1156
Total de horas condicionadas	2409	1711	1473	1597
Diferença de horas de condicionamento entre modelos		-29%	-39%	-34%

Tabela 7-8 - Horas de uso de condicionamento artificial na zona do escritório nos modelos FS e FDV.

Os modelos FDV apresentaram também redução nas horas de uso de condicionamento artificial com relação ao com FS, em 29%, 39% (com proteção solar e ventilação noturna) e 34% (com vidro seletivo) respectivamente. As horas de resfriamento

também reduziram na comparação com a fachada simples, resultando em 16% (FDV), 31% (FDV com proteção e ventilação noturna) e 26% (FDV com vidro seletivo) de redução.

7.4.2 Quinta rodada

Nesta rodada, foram simulados os pavimentos 5 e 15, com o objetivo de comparar o consumo de energia de condicionamento, para a zona de escritório, aos resultados do nono pavimento. As variáveis de resposta são: taxa de aquecimento e resfriamento sensível [W] e energia elétrica [kWh] para condicionamento. Os modelos têm as seguintes configurações:

- 5ª rodada: abrange os modelos FS e FDV, com ventilação natural quando possível, condicionamento artificial e vidro comum, no 5º e 15º pavimentos. Foram simulados também os modelos FDV com proteção solar e ventilação noturna.

A tabela a seguir apresenta os resultados do consumo de energia elétrica nos modelos FS e FDV, na zona de escritório, no quinto pavimento.

PAVIMENTO 5	Zona escritório					
	FS		FDV		FDV + Proteção solar + Ventilação noturna	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	6290	4194	614	3936	614	2522
Total Eletricidade [kWh]	10484		4550		3136	
Subtotal diferença com relação a FS [%]			-90%	-6%	-90%	-40%
Total diferença com relação a FS [%]			-57%		-70%	

Tabela 7-9 - Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, no quinto pavimento.

A tabela a seguir apresenta os resultados do consumo de energia elétrica nos modelos FS e FDV, na zona de escritório, no décimo quinto pavimento.

PAVIMENTO 15	Zona escritório					
	FS		FDV		FDV + Proteção solar + Ventilação noturna	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	6710	3978	636	3586	636	2256
Total Eletricidade [kWh]	10688		4222		2892	
Subtotal diferença com relação a FS [%]			-91%	-10%	-91%	-43%
Total diferença com relação a FS [%]			-60%		-73%	

Tabela 7-10- Consumo de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, no décimo quinto pavimento.

A análise dos resultados das simulações para os três pavimentos revela que há diferença no consumo de energia elétrica de acordo com a altura dos mesmos. O pavimento mais baixo apresenta um consumo maior que os demais (4% de acréscimo), no modelo FDV, sendo que o mais alto apresenta um menor uso de energia elétrica para condicionamento (3% de redução). A próxima tabela registra os resultados encontrados.

PAVIMENTO		Zona escritório		
		FS	FDV	FDV + Proteção solar + Ventilação noturna
PAVIMENTO 5	Total Eletricidade [kWh]	10484	4550	3136
	Total diferença com relação ao Pav. 9 [%]	-1%	4%	5%
PAVIMENTO 9	Total Eletricidade [kWh]	10580	4373	2999
PAVIMENTO 15	Total Eletricidade [kWh]	10688	4222	2892
	Total diferença com relação ao Pav. 9 [%]	1%	-3%	-4%

Tabela 7-11 - Consumo total de energia elétrica para condicionamento nos modelos FS e FDV, considerando os três pavimentos.

7.4.3 Sexta rodada

O objetivo desta rodada é investigar o comportamento da ventilação natural na zona do escritório, nos modelos FS e FDV. Todas as rodadas anteriores consideraram o uso de ventilação natural, mas será nesse item do texto que seu efeito será melhor apresentado. Os modelos foram simulados sem o acréscimo de condicionamento artificial, mas com o controle de temperatura definido pelas *schedules* de funcionamento da ventilação apresentados anteriormente. O período em que pode haver ventilação é coincidente com o horário de ocupação do edifício, e está disponível entre as temperaturas internas entre 18 e 26° C. Os modelos têm a seguinte configuração:

- 6ª rodada: abrange os modelos FS e FDV, com ventilação natural e vidro comum, sem proteção solar.

As variáveis de resposta investigadas são o volume de fluxo de ar que circula pelas aberturas das zonas do escritório e da cavidade, do nó 1 (localizado no interior da zona) para o nó 2 (localizado no exterior da zona), nos dois sentidos. Este fluxo foi contabilizado desta forma devido ao uso da abordagem por fluxo de rede ou *airflow network*. As aberturas que permitem a ventilação são: abertura superior e inferior da pele externa da FDV, janelas no

escritório, porta do corredor e janela da recepção. A ação da ventilação cruzada entre fachadas opostas é um efeito importante, principalmente na área do escritório.

Para otimizar as simulações, as janelas de ambas as fachadas foram agrupadas duas a duas, e a iluminação natural e fração de abertura das mesmas foram configuradas por áreas equivalentes.

Para análise do comportamento da ventilação natural no modelo B, dias específicos foram analisados com os valores do fluxo do ar dos modelos registrados hora a hora, para o nono pavimento. As datas selecionadas são as mesmas apresentadas nas simulações do modelo A, escolhidas pelos mesmos critérios principais: disponibilidade de ventilação durante a ocupação (isto é, esquadrias abertas no maior período do dia) e direção predominante do vento.

A ação da ventilação natural no interior dos ambientes é um dos fatores que influenciam a sensação de conforto de seus ocupantes, principalmente pelo efeito proporcionado pela velocidade da movimentação do ar. Para uma análise do conforto promovido pela ventilação no ambiente do escritório, foram buscadas as referências do estudo de Kukreja (1978), apresentadas na tabela a seguir. Esta sistematização foi realizada para climas quentes, mas é citada aqui como parâmetro de avaliação da ventilação natural nos modelos, e ilustrar as vantagens potenciais do maior controle da velocidade do ar nos ambientes promovidos pelo acréscimo da segunda pele às edificações.

VENTILAÇÃO E SEUS EFEITOS	
Velocidade [m/s]	Efeito percebido
0,1 a 0,25	Falta de ventilação
0,25 a 0,5	Significante apenas em baixas temperaturas
0,5 a 1,0	Refrescante
1,0 a 1,5	Confortável, mas o movimento do ar é notado
1,5 a 2,0	Incômodo, limite de velocidade dentro do edifício
2,0	Aceitável em condições de alta temperatura e umidade

Tabela 7-12 – A ventilação e seus efeitos. Fonte: KUKREJA, 1978.

- Data 20 de março. Neste dia, a velocidade do vento está, no programa, entre 4 e 6,6 m/s, um com média de 4,9 m/s, pouco acima da média anual de Curitiba (próxima a 3 m/s). A direção do vento predominante é leste, até o período das 16 horas, aproximando-se do nordeste a partir deste horário.

A figura abaixo representa a direção predominante do vento, sobre o edifício, e a nomenclatura dada às janelas da forma como foram inseridas no programa. As setas indicam a direção predominante do vento neste dia.

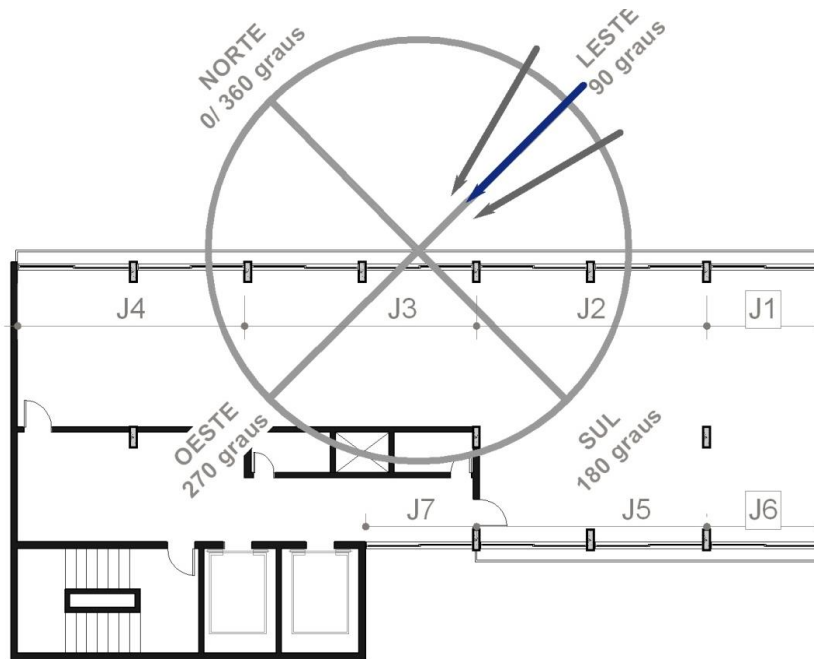


Figura 7.13 - Direção do vento na data de 20 de março.

Para apresentação dos resultados do comportamento da ventilação natural, foram selecionadas os valores obtidos para as janelas J1 (fachada nordeste) e J6 (fachada sudoeste). Estas esquadrias se encontram em fachadas opostas, e poderão representar o efeito da ventilação cruzada na zona do escritório. A figura abaixo é um corte transversal do pavimento, e os dados apresentados são os valores do fluxo do ar médios obtidos para o dia 20 de março, para o modelo FS e FDV, no nono pavimento. A seta que aponta para o interior do edifício é o fluxo do nó 2 para o 1 (efeito vento), enquanto a seta que aponta para o exterior é o fluxo do nó 1 para o 2 (efeito ventilação cruzada). Os resultados são dados em m^3/s (volume) e m/s (velocidade do fluxo). É importante observar que os fluxos de ar que entram e saem por estas janelas não são iguais, porque o pavimento tem sete esquadrias operáveis na fachada nordeste e três na sudoeste, desta forma, o fluxo do ar na J6 tende a ser maior que da J1.

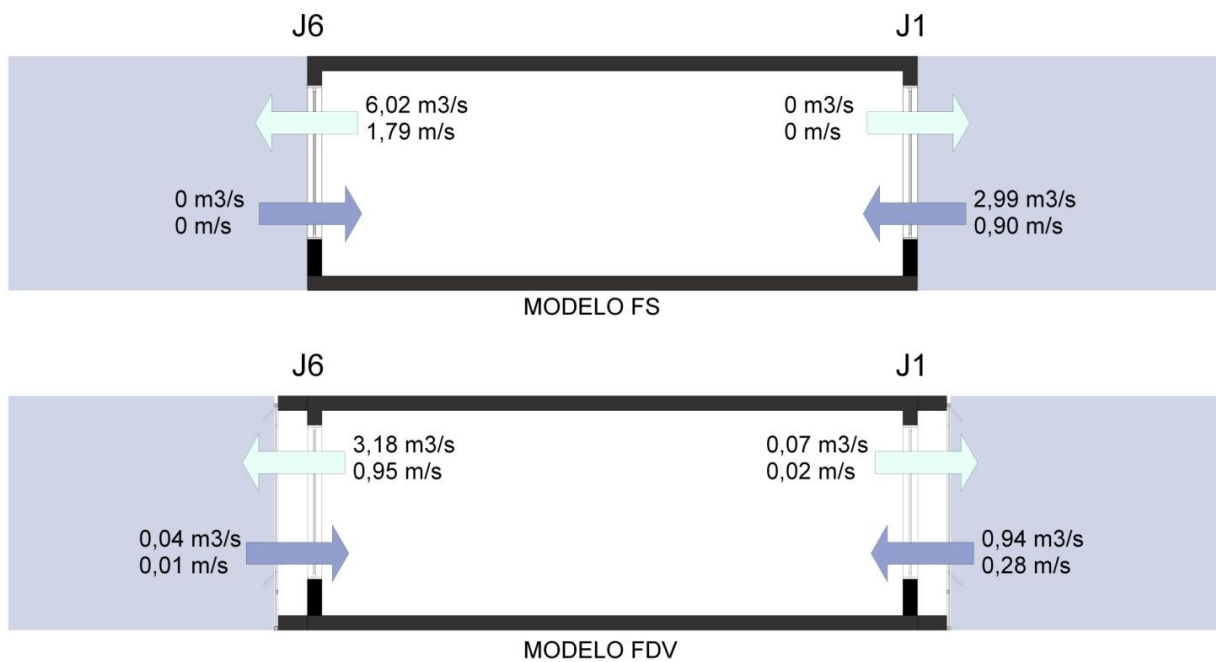


Figura 7.14 - Volume e velocidade médios do fluxo do ar nas janelas da zona do escritório, nos modelos FS e FDV, para 20 de março.

Analisando as velocidades médias do ar junto às esquadrias escolhidas do pavimento, nos dois modelos, observa-se a redução proporcionada pela adição da fachada dupla. No sentido do maior fluxo (efeito da ventilação cruzada na J6), a redução é de 47% comparando os dois modelos. Pela tabela dos efeitos provocados pela ventilação, apresentada anteriormente, o modelo FS apresenta uma velocidade do ar considerada incômoda, e provavelmente seus ocupantes sentiriam a necessidade de fechar as janelas na fachada sudoeste. A média de temperatura de 19,6° C no período de ocupação, no ambiente de escritório, com o fechamento das janelas de uma das fachadas passaria a ter média de 21,2° C. Este é um dia considerado confortável, mas em dias mais quentes esta diferença entre a abertura ou não das esquadrias poderá levar ao desconforto e aumento da necessidade de uso de condicionamento artificial.

O gráfico a seguir apresenta o volume do fluxo do ar no sentido do nó 1 para o 2 (de dentro da zona para o exterior), para o período das 8 às 20 horas. Comparando os dois modelos, o FDV apresenta um momento de velocidade do ar considerada incômoda (acima de 1,5 m/s), no fluxo oriundo da janela J6, às 14 horas. Já o modelo FS, apresenta 8 momentos de desconforto por ventilação nesta mesma janela.

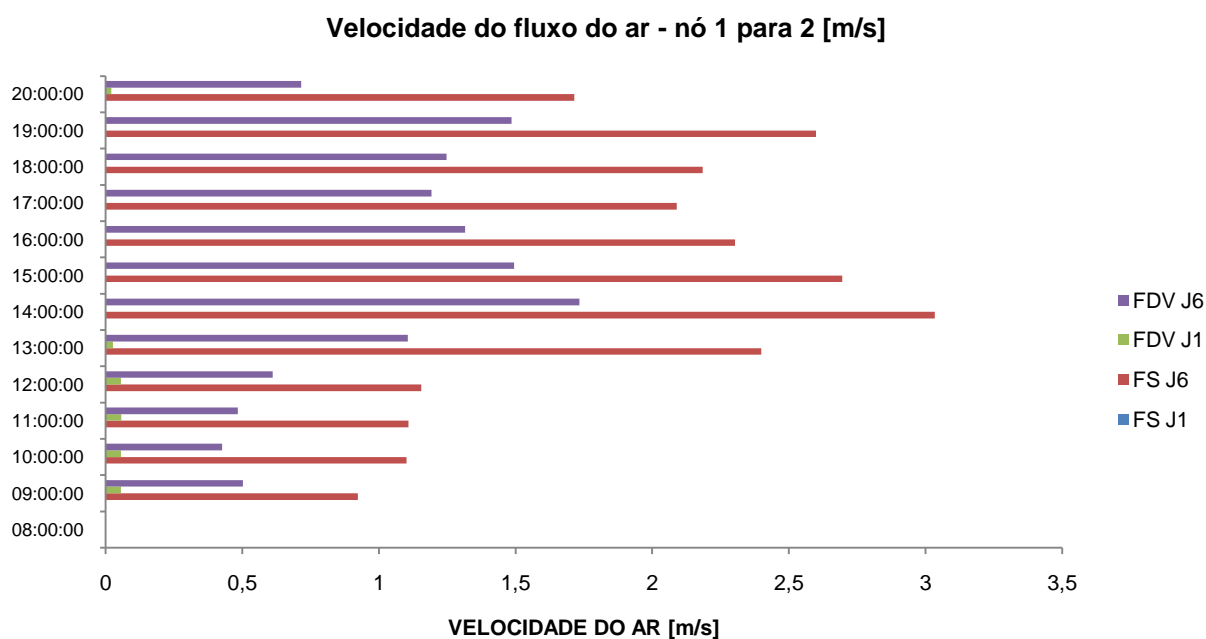


Figura 7.15 - Velocidade do ar no sentido do nó 1 para o 2 na data de 20 de março.

O gráfico a seguir apresenta o volume do fluxo do ar no sentido do nó 2 para o 1 (do exterior para dentro da zona), para o período das 8 às 20horas. O fluxo do ar neste sentido é menor para os dois modelos, sendo mais intenso na J1. Apesar da ventilação ter uma intensidade maior no FS, não chega a causar desconforto.

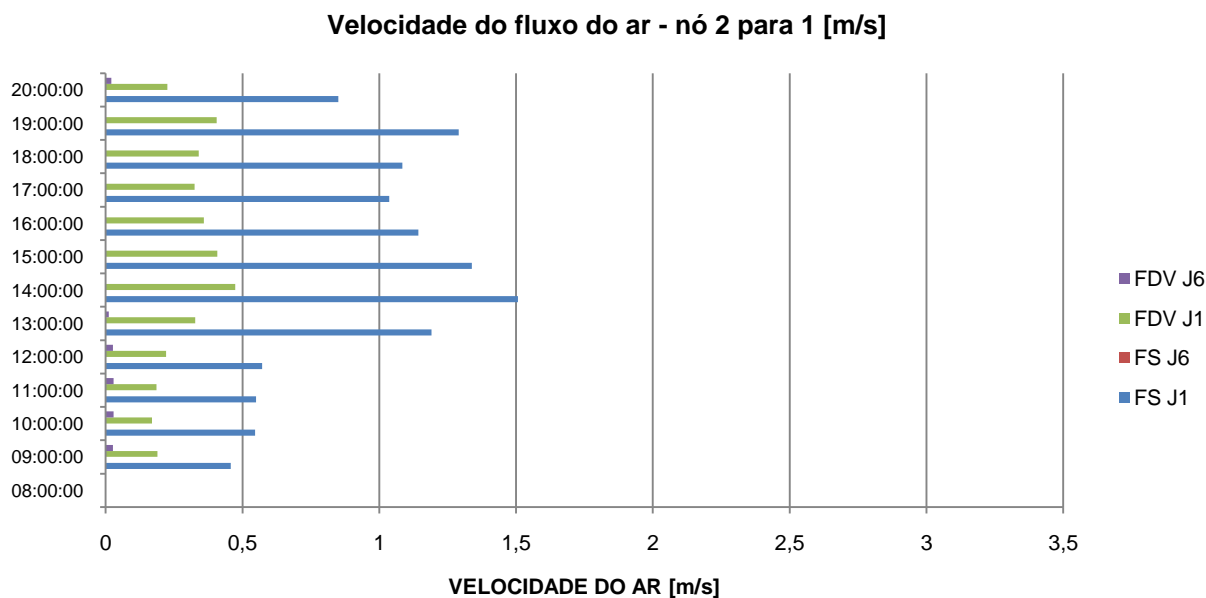


Figura 7.16 - Velocidade do ar no sentido do nó 2 para o 1 na data de 20 de março.

- Data 20 de setembro. Neste dia, a velocidade do vento foi considerada entre 0 e 8,25 m/s, com média de 5 m/s. A direção do vento predominante é oeste, noroeste e norte, até o período das 19 horas, aproximando-se do sudoeste a partir deste horário e às 11 horas da manhã.

A figura abaixo representa a direção predominante do vento, sobre o edifício, e a nomenclatura dadas às janelas da forma como foram inseridas no programa. As setas indicam a direção predominante do vento neste dia.

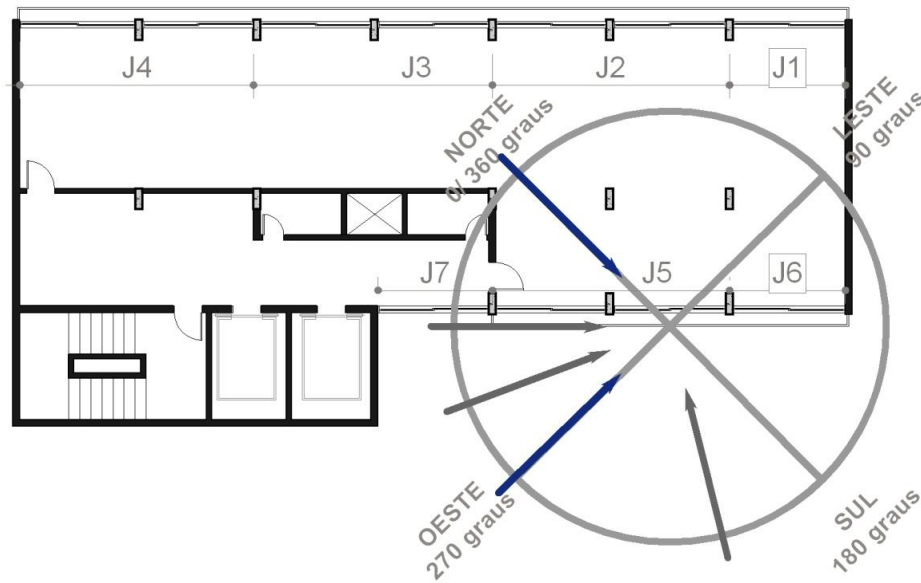


Figura 7.17 - Direção do vento na data de 29 de setembro.

Observando as direções predominantes do vento, percebe-se que a ação do vento será mais efetiva sobre a fachada sudoeste, diferente do primeiro exemplo.

A semelhança do apresentado no item anterior, foram selecionadas os valores obtidos para as janelas J1 (fachada nordeste) e J6 (fachada sudoeste). A figura a seguir é um corte transversal do pavimento, e os dados apresentados são os valores do fluxo do ar médios obtidos para o dia 29 de setembro, para o modelo FS e FDV, no nono pavimento.

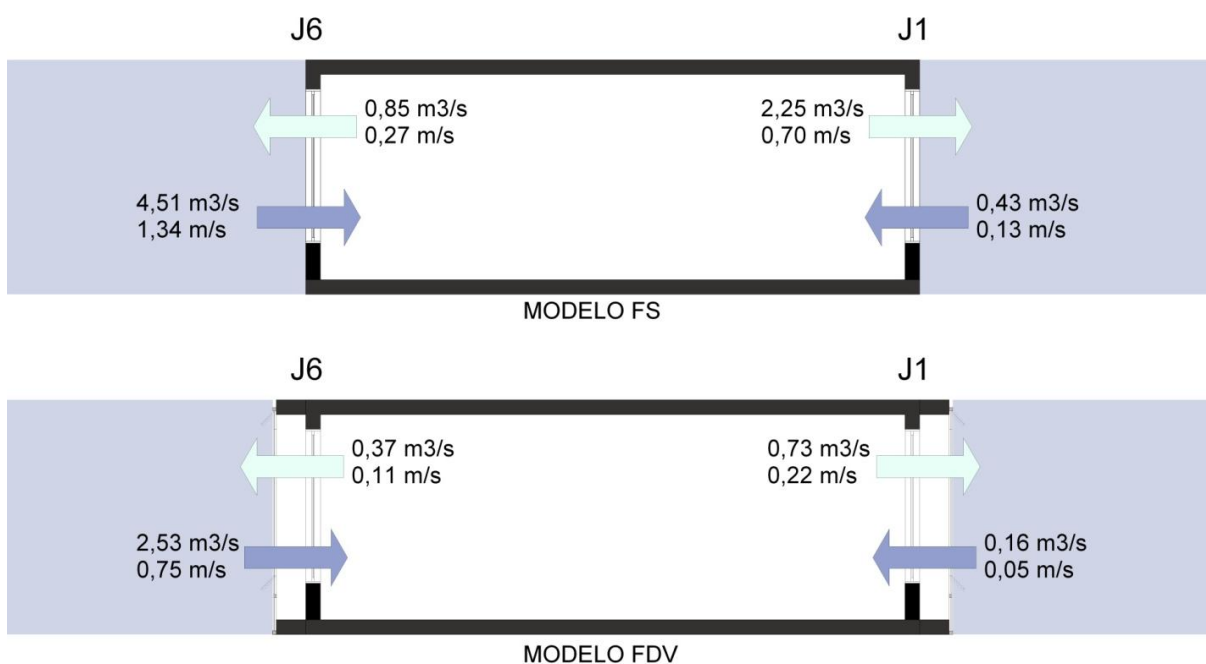


Figura 7.18 - Volume e velocidade médios do fluxo do ar nas janelas da zona do escritório, nos modelos FS e FDV, para 20 de setembro.

Analisando as velocidades médias do ar junto às esquadrias escolhidas do pavimento, nos dois modelos, observa-se a redução proporcionada pela adição da fachada dupla. No sentido do maior fluxo (efeito do vento na J6), a redução é de 44%. Nesta situação, aparentemente não há desconforto causado pela velocidade do ar, mas este fato deve ser confirmado na análise dos gráficos horários.

O gráfico a seguir apresenta o volume do fluxo do ar no sentido do nó 1 para o 2 (de dentro da zona para o exterior), para o período das 8 às 20 horas. Comparando os dois modelos, o FS apresenta dois momentos de velocidade do ar considerada incômoda (acima de 1,5 m/s), no fluxo oriundo da janela J1, às 17 e 19 horas. Já o modelo FDV mantém a movimentação do ar abaixo de 1,5 m/s.

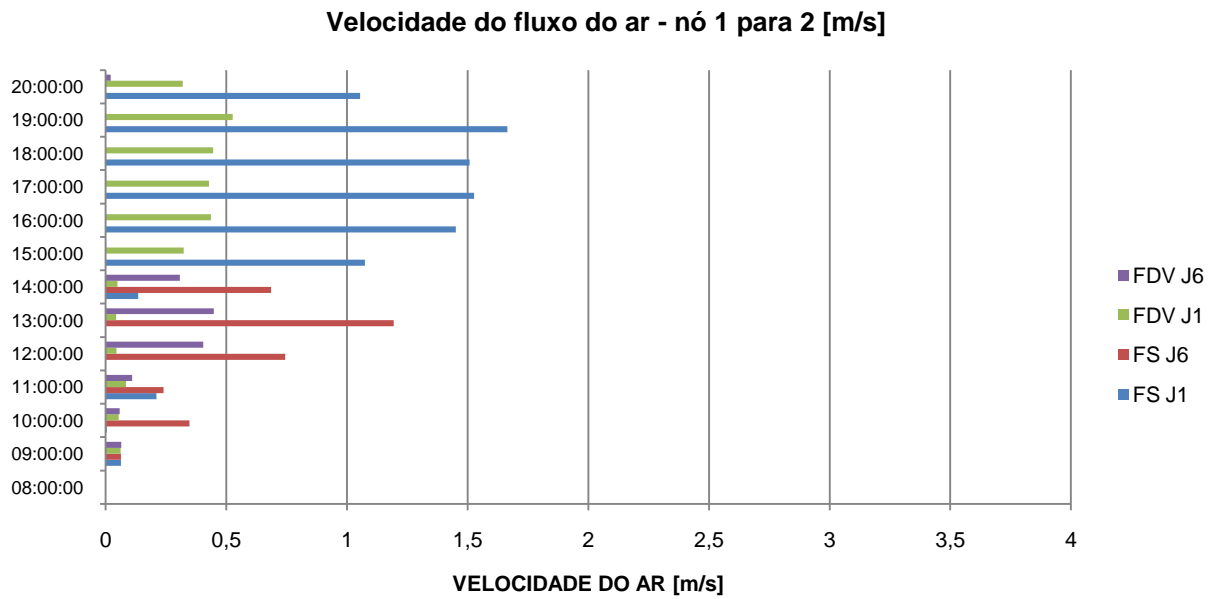


Figura 7.19 - Velocidade do ar no sentido do nó 1 para o 2 na data de 20 de setembro.

O gráfico a seguir apresenta o volume do fluxo do ar no sentido do nó 2 para o 1 (do exterior para dentro da zona), para o período das 8 às 20 horas. O fluxo do ar neste sentido é maior para os dois modelos, sendo mais intenso na J6.

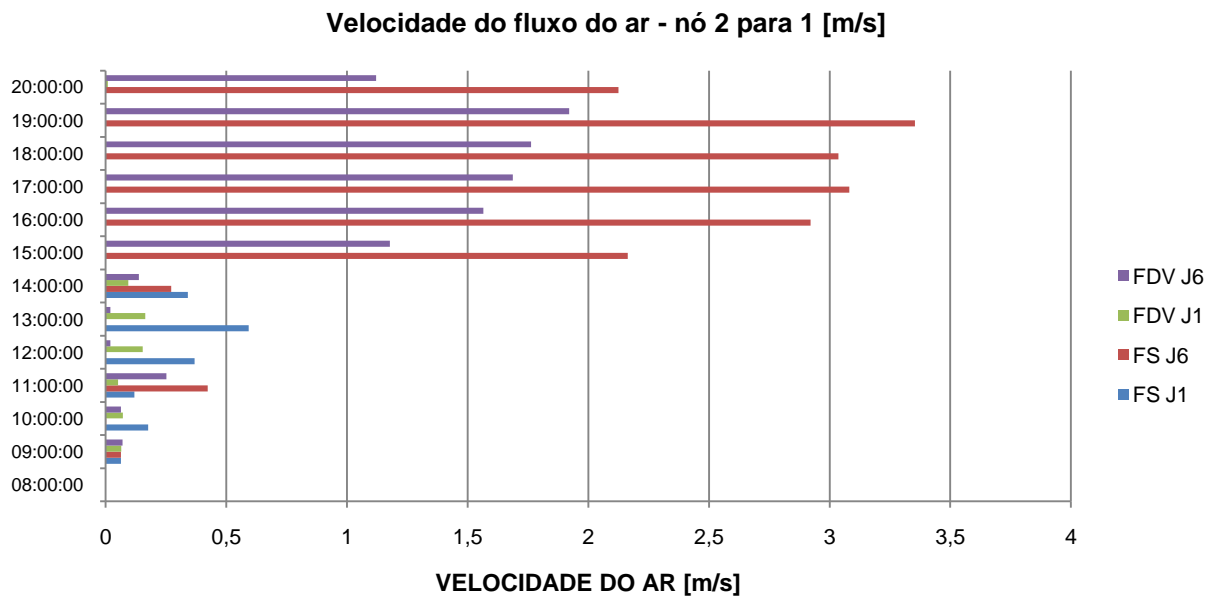


Figura 7.20 - Velocidade do ar no sentido nó 2 para 1 na data de 20 de setembro.

Comparando os dois modelos, o FDV apresenta quatro momentos de velocidade do ar considerada incômoda (acima de 1,5 m/s), no fluxo sobre a janela J6, a partir das 16 horas. Já o modelo FS, apresenta 6 momentos de desconforto por ventilação nesta mesma janela,

todos acima de 2 m/s chegando a 3,35 m/s. Desta forma, as janelas teriam que ser fechadas devido ao grande incômodo proporcionado pela velocidade da movimentação do ar.

Uma observação se faz importante: os dados de vento utilizados nas simulações foram coletados em uma área pouco ocupada da cidade, e os coeficientes de pressão do vento são calculados automaticamente pelo programa. Isto é, diferenças podem existir entre o comportamento do vento no meio urbano e os dados inseridos para a simulação. Além disso, a abordagem por fluxo de rede (*airflow network*) é menos precisa que programas de dinâmica de fluidos, por exemplo. No entanto, a análise é considerada válida porque compara modelos nas mesmas condições. Desta forma, o melhor controle do fluxo do ar proporcionado pela FDV, como projetada neste estudo, trará benefícios para a obtenção de melhor conforto para os ocupantes deste edifício, por ter uma velocidade mais próxima ao desejado e permitir que as janelas fiquem abertas para ventilação em um número maior de horas, considerando a operação no modo passivo do edifício.

7.4.4 Sétima, oitava e nona rodadas

O objetivo destas rodadas é analisar comparativamente as temperaturas internas na zona de escritório dos modelos com FS e FDV. Foram simulados o modelo FS e o FDV. A descrição dos modelos conforme as rodadas são:

- 7ª rodada: abrange os modelos FS e FDV, no modo passivo de operação, com presença da ventilação natural, sem condicionamento artificial, vidro comum e uso de proteção solar.
- 8ª rodada: abrange o modelo FDV, no modo passivo de operação, com presença da ventilação natural, sem condicionamento artificial, vidro comum, uso de proteção solar e ventilação noturna.
- 9ª rodada: abrange o modelo FDV, no modo passivo de operação, com presença da ventilação natural, sem condicionamento artificial e vidro seletivo de baixa emissividade.

A ventilação noturna é um recurso de resfriamento passivo. Consiste em manter as aberturas do edifício abertas durante o período não ocupado, com o intuito de resfriar os materiais da edificação pela ação da ventilação sobre materiais de grande massa térmica, como por exemplo o concreto. Na simulação, a ventilação noturna foi configurada apenas

para a zona da cavidade. A ventilação passa a ser constante nesta zona, com a abertura das esquadrias da pele externa, desde que atendam as condições definidas pelo controle de temperatura da rotina de funcionamento. Isto é, são abertas na faixa de temperaturas entre 18 e 26° C.

A tabela abaixo registra os resultados obtidos nas rodadas de simulações, comparando as temperaturas médias por mês e anual nos diferentes modelos, na zona de escritório.

Data	Zona escritório						
	EXTERIOR [°C]	FS [°C]	FS proteção solar [°C]	FDV [°C]	FDV proteção solar [°C]	FDV proteção solar + ventilação noturna [°C]	FDV vidro seletivo [°C]
JANEIRO	20.6	25.6	25.5	24.8	24.3	23.8	24.4
FEVEREIRO	20.7	25.7	25.6	25.1	24.5	24.0	24.6
MARÇO	19.6	24.3	24.3	23.6	23.2	22.7	23.3
ABRIL	16.3	22.1	22.1	21.6	21.1	20.7	21.2
MAIO	14.6	20.5	20.6	19.7	19.5	19.3	19.7
JUNHO	13.1	19.8	19.9	18.9	18.6	18.4	18.8
JULHO	12.5	19.6	19.8	18.5	18.3	18.2	18.7
AGOSTO	13.6	20.6	20.6	20.4	19.8	19.4	19.9
SETEMBRO	15.3	21.6	21.6	20.6	20.1	19.7	20.2
OUTUBRO	14.2	20.5	20.5	19.8	19.5	19.2	19.6
NOVEMBRO	18.0	23.4	23.4	22.7	22.3	21.8	22.3
DEZEMBRO	17.8	23.5	23.4	23.2	22.6	22.1	22.6
TEMPERATURA MÉDIA ANUAL_ZONA [C]	16.37	22.28	22.28	21.59	21.14	20.79	21.28

Tabela 7-13 - Temperaturas internas médias dos modelos, na zona escritório.

Analisando a tabela, observa-se que no modelo FDV as temperaturas médias são menores, sendo ainda mais reduzidas com o acréscimo da proteção solar e da ventilação noturna. Com proteção solar, o modelo FS não apresenta alteração. Para entender melhor as vantagens do uso da FDV no funcionamento passivo do edifício, foi realizada a análise das horas ocupadas considerando a faixa de temperaturas definidas no estudo. A proteção solar está presente, nos modelos FDV, apenas nos períodos de maior calor, por isso os valores de horas abaixo de 18° C são iguais.

A tabela a seguir apresenta os valores obtidos para as horas de ocupação fora da faixa de temperaturas do estudo. O número de horas ocupadas é 4745.

Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26°C - Zona escritório					
Modelo	FS	FDV	FDV proteção solar	FDV proteção solar + ventilação noturna	FDV vidro seletivo
Horas de temperatura acima de 26°C	420	697	423	380	440
Horas de temperatura abaixo de 18°C	787	240	240	240	304
Total de horas fora da faixa de operação passiva	1207	937	663	620	744
Diferença com relação a FS [%]		-22%	-45%	-49%	-38%
Temperatura máxima [C]	31.9	31.6	30.6	30.5	30.6
Temperatura mínima [C]	12.6	12.8	12.0	12.0	13.6
Horas fora da faixa de operação passiva / Horas de ocupação [%]	25.4%	19.7%	14.0%	13.1%	15.7%
Percentual de horas acima de 26°C	8.9%	14.7%	8.9%	8.0%	9.3%
Percentual de horas abaixo de 18°C	16.6%	5.1%	5.1%	5.1%	6.4%

Tabela 7-14 - Número de horas de ocupação fora da faixa de operação passiva 18-26° C - Zona escritório.

O modelo FS apresenta 74,6% das horas ocupadas aptas à operação passiva. Das demais horas, 8,9% representam horas de maior calor e 16,6% de frio. Já o modelo FDV tem 80,3% de horas dentro da faixa de temperaturas. As altas temperaturas representam 14,7% das horas. O acréscimo de proteção solar reduz as horas de calor para 8,9%, e com o uso de ventilação noturna da cavidade, este valor cai para 8%. Com uso de vidro seletivo de baixa emissividade, tem-se 15,7% de horas fora da faixa estipulada, 9,3% por calor e 6,4% por frio. Desta forma, esta solução não apresenta vantagens com relação ao uso do modelo de FDV com vidro comum, considerando o acréscimo de proteção solar e uso de ventilação noturna. No melhor cenário, o modelo FDV apresenta 86,9% das horas compreendidas entre 18 e 26° C.

O gráfico a seguir permite a melhor visualização da diferenças entre modelos.

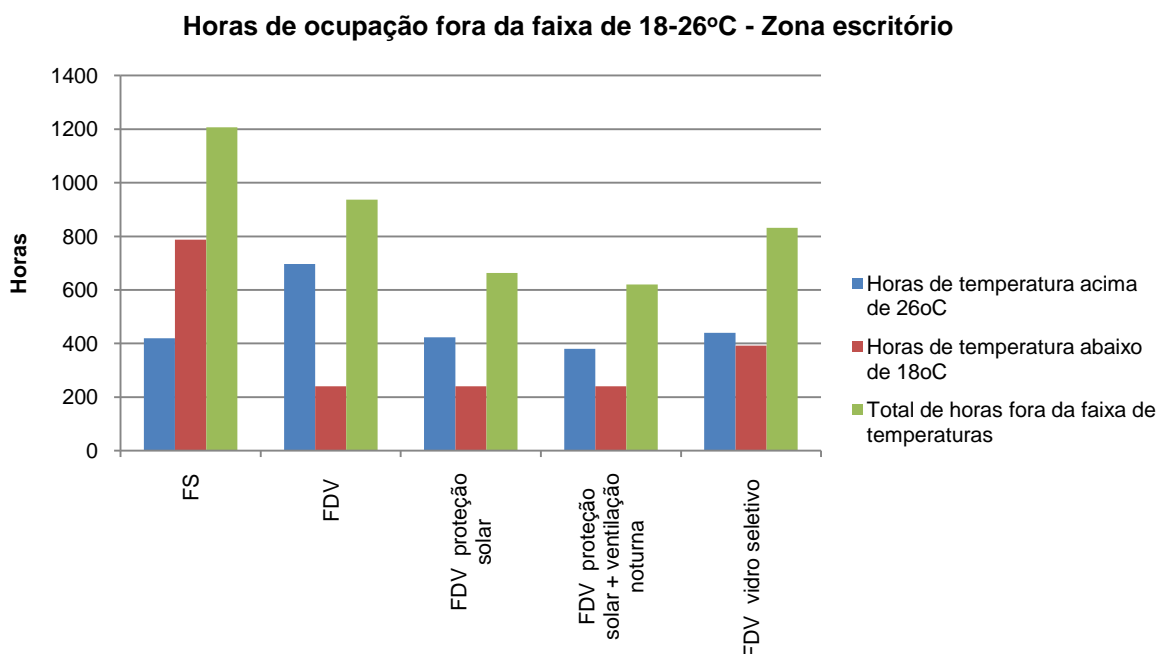


Figura 7.21 - Horas de ocupação fora da faixa de temperaturas nos modelos.

Outra análise realizada compreende a distribuição das temperaturas destas horas ocupadas fora da faixa de operação passiva em intervalos de temperaturas. Para as temperaturas acima de 26° C , foi elaborada a tabela apresentada a seguir.

Distribuição das temperaturas das horas de ocupação acima de 26°C - Zona escritório									
Faixa de temperaturas	FS		FDV		FDV proteção solar		FDV proteção solar + vent. Noturna		
	Horas	%	Horas	%	Horas	%	Horas	%	
Total de horas acima de 26° C	420		697		423		380		
26-27°C	189	45%	432	62%	228	54%	198	52%	
27-28°C	103	25%	133	19%	109	26%	111	29%	
28-29°C	70	17%	76	11%	57	13%	45	12%	
29-30°C	39	9%	39	6%	23	5%	23	6%	
30-31°C	17	4%	16	2%	6	1%	3	1%	
Acima de 31°C	2	0.5%	1	0.1%		0.0%		0%	

Tabela 7-15 - Distribuição das temperaturas das horas de ocupação acima de 26° C - Zona escritório.

A partir da análise dos dados da tabela, observa-se que os modelos com FDV concentram a maior parte das horas de calor até a temperatura interna de 28° C, enquanto o modelo FS apresenta comparativamente maior número de horas com temperaturas mais altas. O modelo FS tem 128 horas (2,7% das horas ocupadas) de temperaturas acima de 28° C,

contra 132 (2,8%) no FDV, 86 (1,8%) no FDV com proteção solar e 71 (1,5%) no FDV com ventilação noturna.

Analisando a distribuição das temperaturas abaixo de 18° C (tabela a seguir), observa-se que o modelo FDV concentra a maior parte das horas de frio entre 17 e 18° C (81% do total). O modelo FS tem, proporcionalmente, maior número de horas em temperaturas mais baixas que o FDV. Esta análise auxilia o entendimento das razões que levam à grande diferença entre a fachada simples e a dupla quanto à demanda por aquecimento artificial.

Distribuição das temperaturas das horas de ocupação abaixo de 18 °C - Zona escritório				
Faixa de temperaturas	FS		FDV	
	Total de horas abaixo de 18° C	787		240
18-17°C	283	36%	195	81%
17-16°C	268	34%	17	7%
16-15°C	166	21%	4	2%
15-14°C	53	7%	12	5%
14-13°C	14	2%	11	5%
Abaixo de 13°C	3	0.4%	1	0.4%

Tabela 7-16 - Distribuição das temperaturas das horas de ocupação abaixo de 18°C - Zona escritório.

A orientação solar do edifício pode ser um fator que prejudica o desempenho e o conforto dos ocupantes do edifício, principalmente pela exposição da fachada sudoeste. Assim, uma última rodada de simulações foi realizada para o edifício orientado no eixo norte-sul, apenas para efeito de comparação no âmbito deste estudo.

7.4.5 Influência da orientação solar

As simulações foram realizadas com a alteração do ângulo de orientação solar do edifício, de forma que as fachadas com aberturas estejam voltadas para o norte e para o sul, no cenário 1 (com condicionamento artificial) e cenário 2 (modo de operação passivo). Foram simulados os modelos FS e FDV (com proteção solar e ventilação noturna no cenário 2).

7.4.5.1 Cenário 1 – influência da orientação sobre a demanda por condicionamento artificial

A tabela a seguir apresenta o consumo de energia para condicionamento dos modelos FS e FDV, comparando a orientação real e a simulada para cada modelo.

Modelo	FS		FS Orientação Norte Sul		FDV		FDV Orientação Norte Sul	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	6290	4194	5988	3774	625	3748	627	2837
Total Eletricidade [kWh]	10484		9762		4373		3464	
Subtotal diferença com relação à orientação real [%]			-5%	-10%			0%	-24%
Total diferença com relação à orientação real [%]			-7%				-21%	

Tabela 7-17 - Consumo de energia elétrica para condicionamento, comparando os modelos FS e FDV na orientação real e na simulada.

Como esperado, a orientação norte-sul das fachadas resulta em menor consumo de energia para condicionamento tanto para o modelo FS como para o FDV. A maior diferença está na demanda por resfriamento, redução de 10% (modelo FS) e 24% (modelo FDV) respectivamente. A diferença maior na necessidade por resfriamento, no modelo FDV, se dá, em parte, porque a fachada dupla funciona como uma marquise horizontal, diminuindo a insolação indesejada no interior do escritório durante o período do verão. Este efeito de sombreamento é reduzido na orientação real do edifício, parcial para leste e oeste, quando o sol fica em altura aparente menor e a incidência direta no interior dos ambientes é maior.

Imaginando a presença de uma marquise no modelo FS, sem a adição da segunda pele (a FDV), com a mesma profundidade (40 centímetros), a demanda por resfriamento seria 16% menor, entretanto, o consumo de energia para aquecimento ainda se manteria alto. Ou seja, a proteção solar fixa e externa, caracterizada por marquises ou *brises soleils*, representam uma solução para a redução da energia de condicionamento quando o edifício se encontra em uma condição climática onde o desconforto é causado principalmente pelo calor, o que não é a situação de Curitiba.

Quanto à necessidade por aquecimento, a orientação para norte/ sul promove a redução na demanda para o modelo FS em 5%, no entanto, este valor se mantém inalterado para o FDV.

7.4.5.2 Cenário 2 – influência da orientação sobre as temperaturas internas na zona do escritório

As simulações foram repetidas para o modelo FS e FDV no cenário 2, ou seja, no modo de operação passivo do edifício. A análise da influência da orientação sobre o funcionamento passivo do edifício foi feita a partir da comparação das horas ocupadas fora da faixa de temperaturas estipulada para o estudo. A tabela a seguir apresenta os dados obtidos nas simulações.

Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26°C - Zona escritório						
Modelo	FS	FS Orientação Norte Sul	FDV	FDV_Orientação Norte Sul	FDV proteção solar + vent. Noturna	FDV proteção solar + vent. Noturna - Orientação Norte Sul
Horas de temperatura acima de 26°C	420	448	697	577	380	368
Horas de temperatura abaixo de 18°C	787	708	240	207	240	207
Total de horas fora da faixa de temperaturas	1207	1156	937	784	620	575
Diferença com relação a orientação real do edifício [%]		-4%		-16%		-27%
Temperatura máxima [C]	31.9	31.4	31.6	30.6	30.45	30.0
Temperatura mínima [C]	12.6	12.7	12.0	12.7	12.8	13.6
Horas fora da faixa de operação passiva/ Horas de ocupação [%]	25.4%	24.4%	19.7%	16.5%	13.1%	12.1%
Percentual de horas acima de 26°C [%]	8.9%	9.4%	14.7%	12.2%	8.0%	7.8%
Percentual de horas abaixo de 18°C [%]	16.6%	14.9%	5.1%	4.4%	5.1%	4.4%

Tabela 7-18 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C na orientação real e no fictício norte.

Da mesma forma que no item anterior, a orientação norte-sul resulta em melhora do desempenho da zona do escritório com relação à orientação real, em todos os modelos. As horas de operação passiva do modelo FS passam a ser 73,4% do total, e no modelo FDV são de 83,5 % (sem proteção solar) e 87,9 % (com proteção solar e ventilação noturna).

7.5 Análises complementares

7.5.1 Simulações do modelo B com subdivisões internas

As simulações do modelo B foram realizadas considerando a planta do tipo livre, sem subdivisões internas. Dúvidas podem surgir se o melhor desempenho proporcionado pela adição da fachada dupla ventilada se manterá caso o pavimento tipo seja dividido em salas

menores. Um rápido grupo de simulações foi realizado com a zona do escritório compartimentada em três salas menores. A figura a seguir apresenta a planta com o layout.

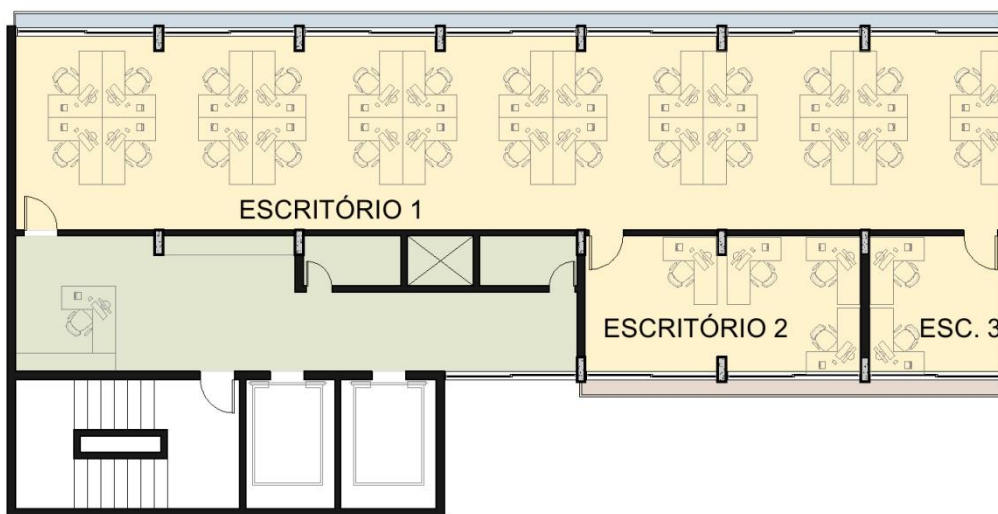


Figura 7.22 - Planta do pavimento tipo com subdivisão da zona do escritório.

A tabela a seguir apresenta o consumo de energia elétrica para condicionamento comparando o modelo com a planta tipo e a subdividida.

	Zona escritório			
	FDV		FDV escritório subdividido	
	AQUEC. [W]	RESF. [W]	AQUEC. [W]	RESF. [W]
Subtotal Eletricidade [kWh]	625	3748	683	3058
Total Eletricidade [kWh]	4373		3741	
Subtotal diferença com relação à FDV sem subdivisão [%]			9%	-18%
Total diferença com relação à FDV sem subdivisão [%]			-14%	

Tabela 7-19 - Consumo de energia elétrica para condicionamento, comparando os modelos FDV.

Nesta configuração de planta, o desempenho do modelo é bom, com pequeno aumento da necessidade de aquecimento dos ambientes. A necessidade de resfriamento diminui, provavelmente porque, com a subdivisão em salas menores, o equipamento de ar condicionado utilizado consegue ser mais eficiente. Mas uma condição deve ser mantida: as salas devem ter aberturas que permitam a ventilação cruzada do ar entre as fachadas opostas. Nas simulações, estas aberturas estão representadas pelas portas das salas.

A simulação foi repetida para a condição de operação passiva, sem condicionamento artificial e com proteção solar. A seguir é apresentada a análise das horas de temperaturas fora da faixa de temperaturas comparativa entre modelos.

Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26°C - Zona escritório				
Modelo	FDV - ESCRITÓRIO PLANTA LIVRE	FDV - ESCRITÓRIO 1	FDV - ESCRITÓRIO 2	FDV - ESCRITÓRIO 3
Horas de temperatura acima de 26°C	423	696	484	832
Horas de temperatura abaixo de 18°C	334	235	236	134
Total de horas fora da faixa de operação passiva	757	931	720	966
Temperatura máxima [C]	30.6	30.8	29.7	30.6
Temperatura mínima [C]	12.0	15.8	15.9	16.4
Horas fora da faixa de operação passiva / Horas de ocupação [%]	16%	19.6%	15.2%	20.4%
Percentual de horas acima de 26°C [%]	8.9%	14.7%	10.2%	17.5%
Percentual de horas abaixo de 18°C [%]	7%	5.0%	5.0%	2.8%

Tabela 7-20 - Número de horas de ocupação fora da faixa de 18-26° C - Zona escritório

As horas de temperaturas acima de 26° C são, na média, maiores que no modelo com planta livre. Em compensação, os ambientes ficam mais quentes, isto é, apresentam menor número de horas de frio. Ou seja, a subdivisão em salas menores não prejudicará o desempenho geral de forma a inviabilizar o uso de FDV para o edifício.

7.5.2 Simulações do modelo B considerando uma faixa de conforto

Na revisão bibliográfica foi apresentada uma discussão sobre a determinação de temperaturas de conforto que poderiam ser utilizadas pelo estudo. Os resultados apresentados anteriormente não focaram prioritariamente este aspecto. O item do trabalho, descrito na sequência, pretende apresentar uma rápida análise das temperaturas de conforto baseadas na ASHRAE 55, de acordo com as faixas definidas na revisão.

Considerando o cenário de operação passivo, foram calculadas as temperaturas operativas dos modelos FS e FDV, considerando o ano inteiro, para sistematização conforme as faixas de conforto da metodologia da ASHRAE. Para o modelo FDV, foram compostos os valores dos meses considerando o uso de proteção solar quando necessário.

A tabela a seguir apresenta estes resultados.

MÊS	TEMPERATURAS ACEITÁVEIS [C]	NÚMERO DE HORAS DENTRO DA FAIXA DE TEMPERATURAS	
		FS	FDV
JANEIRO	20,9 a 27,9	305	387
FEVEREIRO	20,9 a 27,9	221	320
MARÇO	20,6 a 27,6	354	388
ABRIL	19,5 a 26,5	372	374
MAIO	19 a 26	318	292
JUNHO	18,5 a 25,5	268	232
JULHO	18,3 a 25,3	294	273
AGOSTO	18,7 a 25,7	252	299
SETEMBRO	19,2 a 26,2	344	349
OUTUBRO	18,8 a 25,8	287	279
NOVEMBRO	20,1 a 27,1	317	345
DEZEMBRO	20 a 27	372	392
Total de horas ocupadas em conforto no ano		3704	3930
Horas de conforto no ano [%]		78%	83%

Tabela 7-21 - Horas em conforto, considerando o ano inteiro, conforme a ASHRAE 55.

Por esta análise, o modelo FDV apresenta, potencialmente, um número de horas maior em conforto que o fechamento convencional. No entanto, este aspecto deve ser corroborado por um estudo que aprofunde as questões relacionadas à determinação de conforto térmico, incluindo a variável de umidade relativa, trocas de ar e velocidade do ar nos ambientes.

7.6 Análise dos resultados

Este capítulo descreveu a etapa do trabalho referente às simulações do modelo B. As simulações do modelo B têm por objetivo a proposta de uso do sistema de fachada dupla ventilada como estratégia de *retrofitting* da fachada de um edifício existente, a fim de melhorar o desempenho térmico e energético do edifício selecionado. Uma série de estratégias foi testada, nas simulações, até se chegar à solução considerada mais adequada e com melhor resultado.

A tabela apresentada abaixo resume os resultados obtidos pelas simulações quanto ao desempenho térmico e energético da zona do escritório (em planta livre) na situação atual e com a proposta de adição da fachada dupla ventilada. Foi apresentado o modelo FDV com o

melhor desempenho, isto é, com proteção solar nos períodos de maior calor e uso de ventilação noturna natural da cavidade.

TABELA RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS SIMULAÇÕES DO MODELO B				
MODELO	DESCRIÇÃO DO MODELO	CONSUMO DE ELETRICIDADE* [kWh]		HORAS OCUPADAS DE OPERAÇÃO PASSIVA %**
		AQUEC.	RESF.	
FS – FACHADA EXISTENTE	SITUAÇÃO ATUAL	6488	4092	74,6
		TOTAL = 10580 kWh		
FDV - FACHADA DUPLA VENTILADA	VIDRO SIMPLES E TRANSPARENTE	625	2374	86,9
	PROTEÇÃO SOLAR VENTILAÇÃO NOTURNA DA CAVIDADE	TOTAL = 2999 kWh		

* Consumo de eletricidade para condicionamento artificial dos ambientes

** Horas contabilizadas no modo passivo, isto é, sem uso de condicionamento artificial, no período de ocupação (dias de semana e no horário das 8 às 20 horas).

Tabela 7-22 - Tabela resumo dos resultados obtidos pelas simulações do modelo B.

O uso do sistema de fachadas duplas ventiladas, no *retrofitting* da fachada existente, resultou na melhora do desempenho do edifício, incluindo a redução do consumo de energia elétrica (72 % de economia), principalmente na condição de aquecimento do ambiente do escritório, e o aumento de horas de temperaturas confortáveis durante o período de ocupação. Outras vantagens do seu uso foram apresentadas ao longo do texto, e a sistematização a seguir procura apresentar estas vantagens, e também levantar pontos negativos associados à sua implantação.

Pontos positivos:

Redução do consumo de energia para condicionamento artificial do edifício.

Uso eficiente do dispositivo de proteção solar, instalado na cavidade e protegido das intempéries. Estando fora do ambiente, a proteção solar barra a radiação solar indesejada antes de esta atingir o interior e provocar incômodo para os ocupantes. Seu posicionamento, ainda, não atrapalha a ventilação natural, por deixar desobstruídas tanto as aberturas da pele externa da cavidade quanto as janelas do escritório. Os dispositivos utilizados podem ser de natureza simples, semelhantes às persianas ou cortinas tipo rolo, como as utilizadas no interior dos ambientes. São de fácil manipulação, conferindo ao sistema flexibilidade de abri-las ou fechá-las conforme a necessidade sentida pelo ocupante.

Maior uso da ventilação natural para climatização passiva do ambiente de escritório, por dois fatores principais. O primeiro diz respeito ao controle da velocidade do fluxo do ar que entra no ambiente, originado pelo vento. A posição e as dimensões das aberturas da cavidade oferecem um obstáculo para o vento, que tende a entrar no ambiente em velocidades menores que numa fachada simples e mais próximas das condições de conforto. O outro fator diz respeito à proteção da janela operável interna das condições climáticas externas, como no caso de ventos fortes ou chuva. Desta forma, é possível abrir as janelas mesmo em condições adversas, diferente de uma fachada convencional. Por estes motivos, é possível afirmar que, com o uso de FDV, os ocupantes poderão desfrutar em um período maior do ano e com mais conforto da ventilação natural para a climatização passiva do ambiente.

Uso de ventilação noturna natural para redução da demanda de condicionamento artificial e das temperaturas internas durante o dia. Nas simulações, a ventilação noturna foi configurada apenas para a zona da cavidade, para manter a proteção do ambiente interno contra intempéries. Mesmo assim, a melhora no desempenho é significativa.

O uso de FDV nos modelos resultou em **redução das horas de temperaturas fora do limite fixado no estudo**, de 18° C. Os motivos disto já foram mencionados anteriormente, como a menor perda de calor dos fechamentos, promovida pela proteção dada pela segunda pele. Nos períodos de maior calor, no entanto, a tendência do modelo FDV é apresentar mais horas de temperaturas acima da faixa estabelecida, de 26° C. Para minimizar este efeito, o uso de proteção solar e ventilação noturna natural apresentaram bons resultados, reduzindo estas horas de maior calor. O sistema ainda tem por característica diminuir a entrada da radiação solar difusa nos ambientes e proporciona um maior controle da ventilação natural, aspectos que vêm a auxiliar a manutenção de temperaturas internas, no modo passivo, mais aceitáveis no verão.

Outra vantagem refere-se à **apreciação estética**. A fachada dupla ventilada representa, para este caso, uma renovação também da plástica da fachada existente, tornando o edifício com aspecto mais contemporâneo, leve e agradável.

Finalmente, a instalação do sistema para o *retrofitting* da fachada existente pode ser executada sem que o edifício deixe de ser ocupado. Como é externo aos ambientes, não é necessário interromper as atividades normais para sua realização, representando um ganho

importante para a administração do edifício. Em uma reforma radical, como as de substituição dos elementos da fachada, os ocupantes precisam ou suspender suas atividades, ou serem relocados para outros locais, o que onera a intervenção e traz prejuízo para as empresas envolvidas. Especialmente neste caso, onde há aluguel de espaços para terceiros, os administradores podem perder seus contratos de locação.

Alguns pontos negativos do uso de FDV são apresentados na sequência:

Alto custo de implantação. O sistema requer que uma estrutura suplementar seja acoplada aos fechamentos existentes para apoiar a segunda pele. O uso de vidro é maior do que na situação de substituição dos elementos da fachada existente, por exemplo, e deve ter maior resistência do que os vidros usados com caixilhos convencionais.

Complexidade de operação. Para obter a melhora do desempenho térmico e energético do edifício com uso de FDV, foram utilizadas estratégias de controle de temperaturas que demandam sistemas automatizados no caso de sua implantação física. Os cenários explorados pelas simulações consideram que a abertura e o fechamento das esquadrias, para ventilação natural, sejam controlados pelas temperaturas internas. Nesta situação, o sistema deverá compreender termostatos, automatização das esquadrias operáveis e um sistema de controle central eletrônico.

Aumento da área construída não utilizável do edifício. A cavidade da FDV representa um considerável aumento na área dos pavimentos (aproximadamente 6%) sem ocupação.

As decisões de projeto para o desenho da fachada dupla ventilada, tomadas neste estudo, repercutem diretamente sobre o desempenho obtido na zona do escritório, tanto no cenário 1 quanto no 2. Projetistas com formações diferentes provavelmente apresentariam abordagens diferentes para a solução do mesmo problema que foi colocado no início desta pesquisa. São algumas decisões que impactam diretamente sobre as temperaturas internas e/ou consumo de energia para condicionamento: material do fechamento da cavidade entre pavimentos (concreto), tipos de vidros escolhidos e de proteção solar, além do dimensionamento das aberturas para ventilação da FDV. A proposta de fachada dupla ventilada final apresentada, portanto, não é a única configuração possível, mas representa as decisões tomadas pelo pesquisador ao longo do desenvolvimento do estudo e reflete os dados coletados na revisão bibliográfica realizada previamente ao início da etapa de simulações.

7.7 O edifício após a proposta de *retrofitting* com fachadas duplas ventiladas

A seguir são apresentadas algumas imagens representando o aspecto final da solução proposta de fachada dupla ventilada.

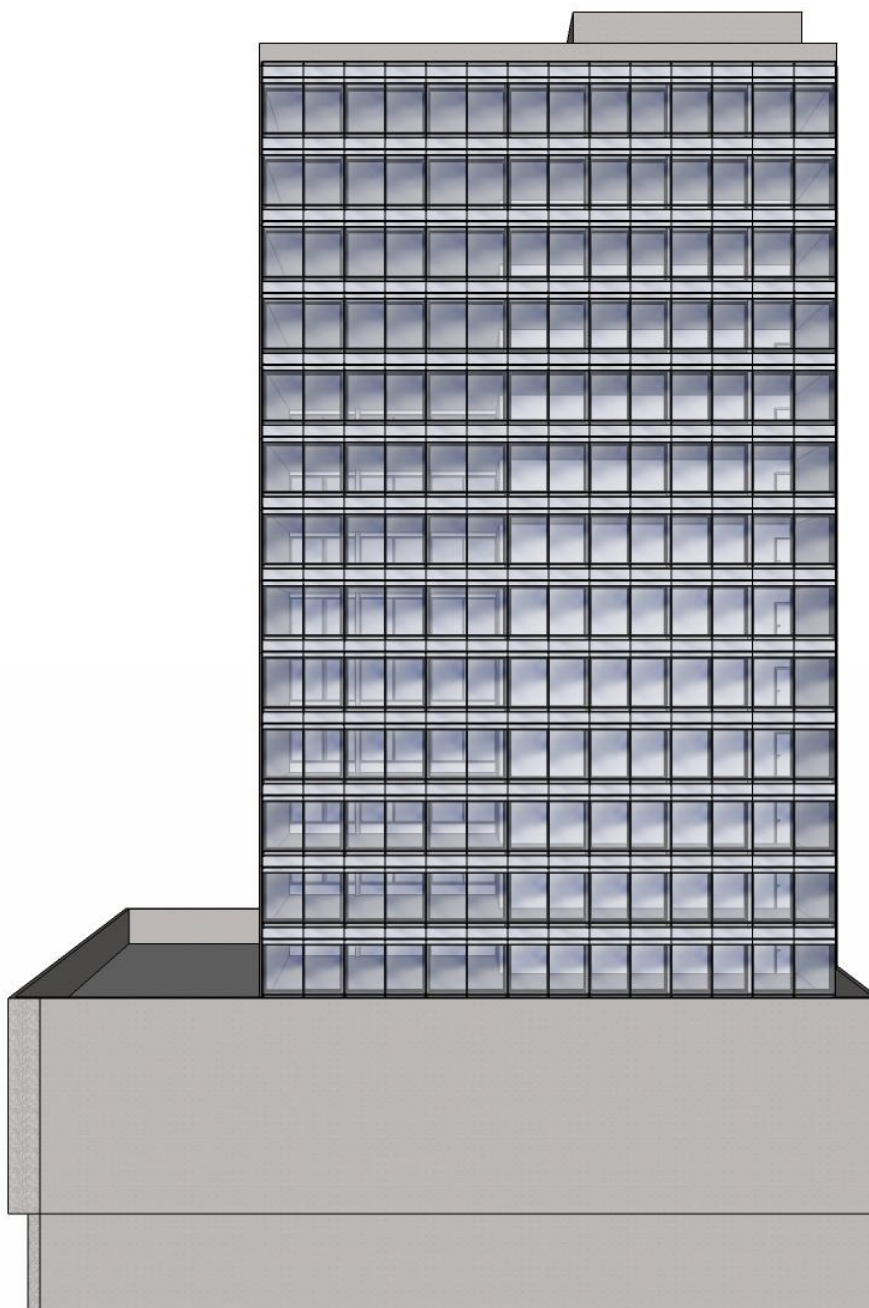


Figura 7.23 - Vista da fachada nordeste.

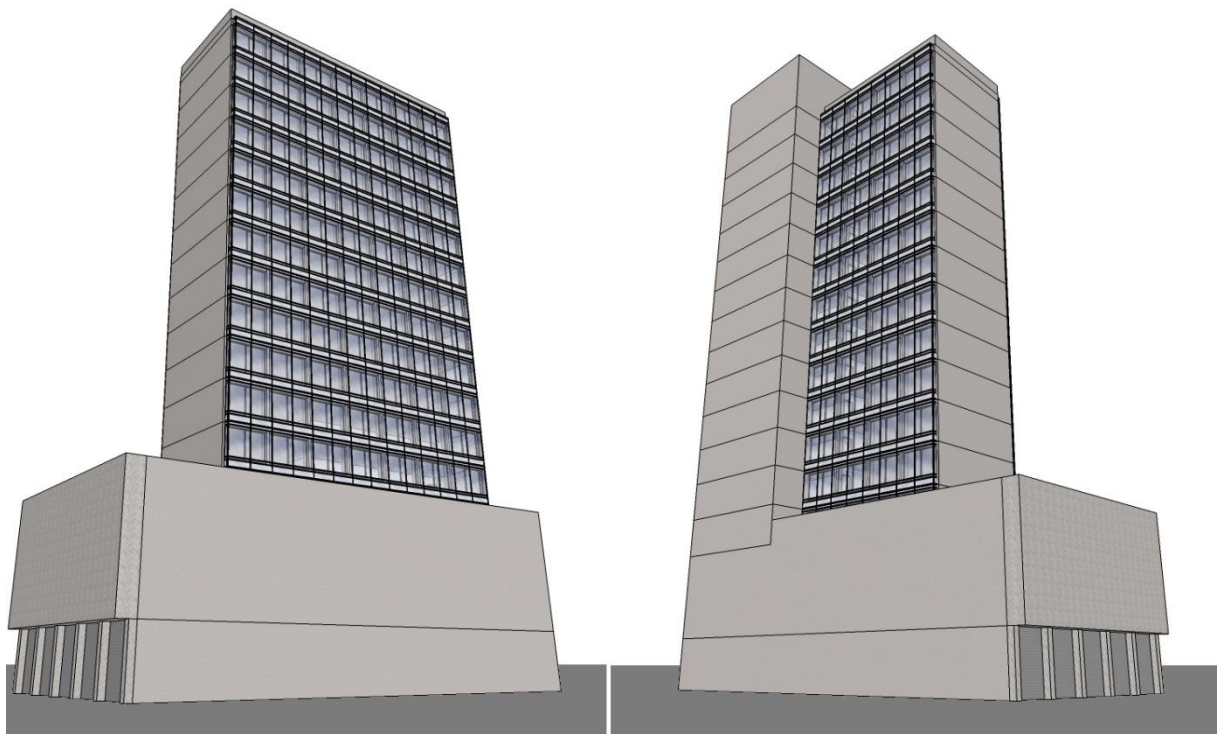


Figura 7.24 - Vistas do observador da fachada nordeste e sudoeste.



Figura 7.25 - Vista do prédio original.

8. CONCLUSÕES

As fachadas duplas ventiladas representam uma tipologia amplamente utilizada na Europa, como uma solução para projetos de edifícios amplamente envidraçados com condições de conforto aceitáveis e consumo energético para condicionamento menor. Esta tipologia de fachada é própria para o uso em climas frios, devido a sua propriedade de conferir maior isolamento térmico aos fechamentos dos edifícios, diminuindo as perdas de calor indesejadas e tornando o uso de aquecimento artificial mais eficiente. Na etapa da revisão bibliográfica, constatou-se a disponibilidade de uma série de artigos publicados em periódicos científicos internacionais sobre o assunto, focando diversos aspectos do sistema. No Brasil, pouca literatura científica está disponível sobre fachadas duplas ventiladas. No entanto, o interesse pelo uso do sistema em edifícios existe, visto a construção do edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro, e a sua proposição em concursos de arquitetura, como na proposta vencedora para a construção do Centro Judiciário de Curitiba.

Curitiba, para a condição climática brasileira, é considerada uma cidade com clima mais frio, pertencendo à zona bioclimática 1 de acordo com a norma NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2003). O clima da cidade apresenta longos períodos no ano de frio, mas o calor no verão também deve ser considerado. Esta situação dificulta as soluções de fachadas de edifícios comerciais que solucionem as condições de conforto para o ano inteiro, em uma condição de operação passiva, pela necessidade de aquecimento no inverno e de resfriamento no verão.

O uso de fachadas duplas ventiladas, em Curitiba se justifica, por seu clima, pela presença de períodos longos de dias frios durante o ano. Os ambientes com fachadas duplas tendem a ser mais quentes e confortáveis no inverno do que uma fachada convencional. Porém, os parâmetros do sistema devem ser extensivamente estudados para que seu uso resulte em um bom desempenho também para a condição de verão.

A partir da análise das informações coletadas na etapa da revisão bibliográfica, conclui-se que estudos através de simulações para diferentes configurações de fachadas duplas, resultantes da alteração dos parâmetros de projeto, podem fornecer uma melhor compreensão da influência da FDV no desempenho geral do edifício. As simulações podem levar ao maior entendimento do funcionamento e da flexibilidade do sistema, e, considerando

os requisitos prioritários para a edificação e seus ocupantes, é possível otimizar o desempenho da mesma e determinar os detalhes técnicos com relação aos parâmetros de projeto a fim de cumprir os objetivos pretendidos.

Na revisão bibliográfica procurou-se apresentar um panorama geral do sistema, privilegiando os textos mais recentes e disponíveis em fontes de publicações científicas. Foram abordados os seguintes assuntos, entre outros:

- Conceito do sistema de fachadas duplas ventiladas e seus componentes.
- Histórico.
- Delimitação das vantagens e desvantagens do uso das FDV.
- Identificar o comportamento físico das FDV.
- Classificar as tipologias de FDV utilizadas no mundo real.
- Identificação dos limitantes e diretrizes de projeto do sistema.
- Abordagens de simulações e resultados esperados.

Para prever o comportamento da FDV e projetá-la corretamente, é preciso considerar dois tipos de diretrizes. A primeira delas são os limitantes de projeto, relacionados com:

- O clima do local.
- A implantação, incluindo orientação solar, condições atmosféricas, obstruções externas, entre outros.
- O uso do edifício, incluindo a determinação das atividades e períodos de ocupação, entre outros.
- Forma da planta e área do pavimento, uso de materiais de construção, pé-direito, entre outros.
- Normas e regulamentos legais que podem incidir sobre o projeto de edifícios.

O segundo tipo refere-se aos parâmetros de projeto sobre os quais o projetista deve tomar decisões:

- *Design* e tipologia da fachada.
- Geometria da cavidade.
- Origem e destino do ar no interior da cavidade, tipo de ventilação desta, uso de ventilação noturna e conexão com sistema de HVAC do edifício.

- Combinação do material do fechamento e dispositivo de sombreamento de acordo com a orientação e tipo de fachada.
- Princípios das aberturas da cavidade, da pele interna e da pele externa.
- Tipo dos fechamentos em vidro (vidro simples ou duplo, colocado na pele exterior ou na interior) e tipo de dispositivos de sombreamento (venezianas, brises, persianas ou cortinas tipo rolô). Escolha dos materiais para os fechamentos e para os dispositivos de sombreamento.
- Posicionamento dos dispositivos de sombreamento.
- Automação dos sistemas de proteção solar, ventilação e condicionamento do ar.

O processo de planejamento da fachada dupla é um processo de otimização de um sistema. Primeiramente deve-se modelar um caso base e verificar seu desempenho. Em seguida, os parâmetros da fachada são alterados, configurando outros modelos que são novamente analisados e comparados com o caso base, até se chegar à composição que apresenta o desempenho mais adequado de acordo com os requisitos pretendidos.

Pela análise dos artigos levantados pela revisão bibliográfica, optou-se, para desenvolvimento da coleta de dados, pelo método de simulação baseados em modelos de abordagem macroscópica, que analisam o edifício como um todo e em períodos mais longos. Foram investigados, pelas simulações, variáveis dos principais processos físicos relacionados ao desempenho térmico englobados pelo uso do sistema de fachadas duplas ventiladas: regime de temperaturas internas, transferência de calor, transmissão solar e comportamento da ventilação natural no ambiente. No entanto, devido aos objetivos do estudo e a técnica escolhida para obtenção dos resultados (análise macroscópica do sistema de FDV), não se procurou entender fisicamente exatamente o que ocorreu no interior da cavidade, e sim como o uso desta tipologia de fachadas influenciou o desempenho térmico e energético de ambientes de escritório, na condição climática de Curitiba.

Uma das principais contribuições desta pesquisa, portanto, é a sistematização do processo de análise do uso de fachadas duplas ventiladas em projetos de arquitetura, englobando a investigação do desempenho térmico e energético dos ambientes do edifício decorrente de diferentes configurações de fachada possíveis. Ainda, mencione-se o fato de apontar para itens de otimização e detalhamento do projeto como profundidade de cavidade, aberturas e sua forma de operação.

8.1 Atendimento aos objetivos propostos e confirmação das hipóteses

O objetivo principal desta pesquisa é analisar o desempenho térmico e energético de edifícios de escritórios com fachadas duplas ventiladas, em condição de clima subtropical, esclarecendo a sua sensibilidade em relação a variáveis de desempenho. Os modelos representativos foram denominados no estudo de modelo A e modelo B. O modelo A baseia-se em uma unidade de escritório de um edifício comercial de Curitiba, configurado a partir de pesquisa junto ao mercado imobiliário, enquanto o modelo B é um edifício real, selecionado para aplicação da estratégia de *retrofitting* de fachada. Desta forma, considerou-se que estes modelos são representativos de edifícios de escritórios na cidade.

O capítulo 5 apresenta a seleção do método de pesquisa e a descrição das técnicas de coleta de dados utilizadas. O capítulo 6 descreve os procedimentos específicos de configuração do modelo A no programa de simulação, assim como os resultados obtidos e a discussão inicial destes. Foram realizadas sete rodadas de simulações, considerando a configuração da fachada simples (modelo base) e da fachada dupla ventilada (modelo proposto), cada uma com variação da configuração do modelo e/ou obtenção de variáveis de resposta diferentes. Como apresentado no objetivo geral, foram obtidos resultados do comportamento da FDV quanto às temperaturas internas, transmissão de calor e radiação solar, temperaturas das superfícies internas, ventilação e consumo de energia elétrica para condicionamento artificial. Estas variáveis foram investigadas tanto para o modelo com FDV quanto para o FS, de foram a estabelecer comparações de desempenho entre os mesmos.

Ao final destas rodadas, foram definidos alguns dos parâmetros do desenho da FDV que levaram ao melhor desempenho térmico e energético do ambiente de escritório analisado, a fim de serem utilizados para as simulações do modelo B. Assim, o estudo considera como a melhor combinação de parâmetros de projeto a seguinte configuração de FDV:

- Profundidade de cavidade de 40 centímetros.
- Uso de vidros simples e transparentes.
- Uso de proteção solar no período de maior calor.

Um dos objetivos específicos do estudo é propor o uso de fachadas duplas ventiladas em um edifício real (o modelo B) pela estratégia de retrofitting da fachada existente, a fim de melhorar o desempenho térmico e energético do edifício selecionado. Este objetivo foi

desenvolvido no capítulo 7, o qual descreve as simulações do modelo B e os resultados obtidos, além da discussão destes. Foram realizadas nove rodadas de simulações, considerando a configuração da fachada simples (modelo base) e da fachada dupla ventilada (modelo proposto), cada uma com variação da configuração do modelo e/ou obtenção de variáveis de resposta diferentes.

Nestas simulações, confirmou-se a melhora do desempenho do ambiente do escritório com o uso da FDV, tanto no consumo de energia para condicionamento, quanto nas horas ocupadas de temperaturas confortáveis.

O estudo apresentou a hipótese de que o uso do sistema de fachada dupla ventilada é uma solução alternativa aos fechamentos convencionais de edifícios de escritórios em Curitiba, promovendo algumas vantagens no seu uso. As análises dos resultados para os dois modelos (A e B) apresentaram, no geral, a melhora do desempenho dos edifícios analisados, em comparação com soluções de fachadas convencionais. Desta forma, considera-se que a hipótese principal foi confirmada.

Foram também confirmados os subitens da hipótese principal.

Redução dos gastos com energia elétrica operacional da edificação relativa ao condicionamento ambiental. Este item foi confirmado nos dois modelos, em especial quanto à necessidade de aquecimento artificial dos ambientes dos edifícios.

Maior aproveitamento da ventilação natural para os ambientes de trabalho, o que reverte em melhoria das condições de conforto para seus ocupantes. A análise da ventilação natural (em especial a análise desenvolvida na apresentação dos resultados do modelo B) verificou que a velocidade da circulação do ar junto aos fechamentos mantém-se próxima às condições consideradas confortáveis, com o uso da FDV, diferente da situação verificada com uso da fachada simples. Desta forma, as janelas podem permanecer um período maior de tempo abertas para permitir a ventilação natural, com conforto, com uso da FDV.

Maior eficiência no uso de proteção solar, com solução mais simples e de menor manutenção. A localização da proteção solar no interior da cavidade, possível na FDV, evita que a radiação solar atinja o interior dos ambientes. Assim, a carga térmica oriunda da fachada é muito reduzida, resultando em redução significativa do uso de condicionamento

artificial para resfriamento nos períodos de maior calor. A mesma solução em uma fachada simples não traz resultados significativos. Como a proteção solar está no interior do ambiente, não evita a entrada da radiação solar, de forma que o consumo de ar condicionado se mantém alto.

Maior disponibilidade de horas para operação passiva do edifício, considerando a faixa de temperaturas internas entre 18°C e 26°C. Este item foi confirmado em ambos os modelos. O uso da FDV reduziu significativamente as horas de desconforto por frio (horas ocupadas abaixo da temperatura de 18° C). Com o uso de proteção solar e ventilação natural noturna, as horas de operação passiva no período de maior calor foram em maior número do que no modelo FS. No modelo B, a FDV apresentou um número de horas de operação passiva, respeitando a faixa de temperaturas do estudo, 12% maior que a FS.

Na sequência é apresentado um quadro resumo dos resultados mais relevantes do estudo, os quais são relacionados ao atendimento dos objetivos propostos e à confirmação das hipóteses apresentada neste item do texto.

8.2 Resultados relevantes

As simulações dos modelos A e B foram realizadas de forma independente, mas chegaram a resultados semelhantes. Desta forma, elaborou-se uma tabela com a apresentação das variáveis de desempenho investigadas e a influência do uso de fachadas duplas ventiladas sobre estas.

VARIÁVEL INVESTIGADA	INFLUÊNCIA DO USO DA FACHADA DUPLA VENTILADA
<p>Temperaturas internas. Faixa de temperaturas de operação passiva do estudo: 18 a 26°C Horário de ocupação: 8h00 às 20h00</p>	<p>Nos modelos FDV sem proteção solar, o número de horas acima da temperatura de 26° C são maiores que no modelo FS. Com o uso da proteção solar quando necessário, este número de horas é reduzido e passa a ser menor que no modelo FS. A maior diferença encontra-se no número de horas em que as temperaturas internas ficam abaixo de 18° C; no modelo FDV a redução é significativa em qualquer uma das configurações utilizadas. Com o uso de FDV, as horas totais de operação passiva, relacionadas às temperaturas internas, é maior do que com a fachada convencional.</p>
Consumo de energia elétrica para condicionamento artificial dos ambientes ocupados.	Redução do consumo de energia para condicionamento, principalmente com o uso de ventilação noturna natural da cavidade e de proteção solar em períodos de maior calor. A redução mais significativa é na demanda por aquecimento.
Transmissão solar (radiação direta e difusa)	O uso da FDV reduz a transmissão solar total para o interior do ambiente, principalmente devido à menor entrada de radiação difusa. Com o uso de proteção solar, a transmissão solar tende a ser ainda mais reduzida, já que o dispositivo de sombreamento, posicionado na cavidade, barra a radiação solar indesejada antes de esta atingir o interior e provocar incômodo para os ocupantes.
Transferência de calor por convecção das superfícies.	Por ser mais protegida, a pele interna do fechamento da zona do escritório perde menos calor no modelo FDV que no FS, caracterizando o melhor isolamento conferido pela adição da cavidade ao modelo. Este dado ajuda a explicar também porque os modelos FDV demandam menor consumo de energia para condicionamento artificial.
Temperaturas das superfícies internas dos fechamentos envidraçados.	A temperatura da superfície interna da janela no modelo FS tende a aproximar-se das variações da temperatura exterior, enquanto a janela do modelo FDV apresenta uma diferença menor com relação às condições do ambiente interno. Em alguns momentos, nas horas analisadas, o modelo FS apresentou diferenças entre a temperatura do ambiente e da superfície do fechamento acima do desejável, causando desconforto por assimetria térmica. Esta situação não foi identificada no FDV.
Uso da ventilação natural para climatização passiva dos ambientes ocupados	A FDV permite um período maior de uso da ventilação natural para climatização passiva do ambiente de escritório, por dois fatores principais: Controle da velocidade do fluxo do ar que entra no ambiente, originado pelo vento. A posição e as dimensões das aberturas da cavidade oferecem um obstáculo para o vento, que tende a entrar no ambiente em velocidades menores que numa fachada simples e mais próximas das condições de conforto. Proteção da janela operável interna das condições climáticas externas, como no caso de ventos fortes ou chuva. Desta forma, é possível abrir as janelas mesmo em condições adversas, diferente de uma fachada convencional.

Tabela 8-1 - Tabela de resumo das variáveis investigadas e a influência da FDV sobre elas.

8.3 Análise crítica dos resultados

A análise geral dos resultados desta pesquisa é apresentada a seguir, seguindo a lógica da sequência de simulações executadas nos modelos A e B. Optou-se pelo uso de uma análise qualitativa, a partir da observação de pontos positivos (ou vantagens) do uso do sistema de fachada dupla ventilada em edifícios de escritórios, em Curitiba, sem deixar de lado a colocação de alguns pontos negativos.

O uso de FDV levou ao aumento das horas quando o edifício pode operar passivamente, principalmente devido à redução das horas de temperaturas baixas. Em Curitiba, segundo a análise bioclimática apresentada na revisão bibliográfica, apresenta temperaturas de conforto em 20% das horas de um ano inteiro, sendo o restante caracterizado por desconforto causado por frio (73.2% das horas) e por calor (6,84% das horas). A partir desta linha de pensamento, o sistema de fachada dupla ventilada mostrou-se uma solução adequada para tornar os ambientes mais confortáveis, pela redução das horas de frio nos ambientes analisados (aproximadamente 5% das horas ocupadas no modelo real), com desempenho superior aos modelos de fachada simples. Observou-se ainda, nas análises do modelo A, que o aumento da profundidade da cavidade contribui para reduzir ainda mais significativamente as horas de frio no interior dos ambientes. No entanto, devido ao padrão de ocupação característico de edifícios de escritórios (cargas térmicas internas elevadas) e a grande extensão dos pavimentos, o problema de desconforto por calor torna-se um fator importante, mesmo em Curitiba. Para que o uso de FDV resulte em redução das horas de temperaturas acima das consideradas confortáveis, em comparação com a FS, é indispensável o uso de proteção solar instalada no interior da cavidade, para os períodos de maior calor.

A redução do consumo de energia para condicionamento artificial do edifício, com o uso de fachada dupla ventilada, é outra conclusão desta pesquisa. Vários fatores contribuem para o melhor desempenho da FDV quanto à demanda por climatização artificial: menor número de horas de temperaturas fora da faixa estipulada pelo estudo, uso eficiente da proteção solar (que evita a ação da radiação solar direta antes desta atingir o interior do ambiente e maior isolamento térmico do fechamento). Como apresentado nas simulações do modelo A, a transmissão solar é reduzida pelo uso da FDV, principalmente quanto à transmissão difusa, assim como a transferência de calor por convecção das superfícies. Isto é, o sistema troca menos calor com o exterior do que uma fachada simples, efeito benéfico para

a eficiência do sistema de condicionamento artificial do edifício, tanto para a condição de resfriamento quanto de aquecimento. O uso conjunto de estratégias passivas nos modelos (proteção solar e ventilação noturna natural da cavidade) promoveu a redução ainda mais significativa do consumo relacionado à climatização.

O uso da ventilação natural para climatização passiva dos ambientes de edifícios de escritórios é problemática, devido à sua imprevisibilidade e a ocorrência de ventos fortes em pavimentos mais altos, além dos problemas de poluição do ar. Existem, inclusive, edifícios que são projetados sem janelas operáveis, principalmente em países norte americanos e europeus. Como levantado na revisão bibliográfica, e confirmado pelas simulações, o uso de FDV contribui para o aumento do uso de ventilação natural para climatização passiva dos ambientes de escritórios. A principal vantagem, verificada pelo estudo, é o maior controle da velocidade do fluxo do ar originado pela ação do vento sobre a fachada com esquadrias operáveis. O posicionamento, forma e dimensões das aberturas da cavidade oferecem obstáculos que levam à redução da velocidade do ar, que tende a entrar nos ambiente em condições mais próximas ao confortável. Nos resultados apresentados, esta vantagem ficou clara, a partir da análise comparativa do comportamento da ventilação natural, nos ambientes dos modelos FS e FDV, em dias com ventos considerados fortes agindo diretamente sobre a fachada. Os momentos de desconforto por ventilação foram significativamente menores no modelo com FDV, permitindo que esta estratégia possa ser utilizada em um período maior do tempo. Outro aspecto a ser levantado, e que não pode ser verificado através das simulações, é o uso simultâneo da ventilação natural e da proteção solar. Em uma fachada convencional, considerando o uso de persianas ou cortinas internas, a ventilação natural através das janelas conflita com o uso do dispositivo de proteção solar. No projeto da fachada dupla proposta por este estudo, todas as aberturas estão desobstruídas, já que o dispositivo de sombreamento localiza-se na porção pele externa mantida fixa. Além destes aspectos comentados, a cavidade adicionada à fachada do edifício auxilia na proteção das janelas operáveis dos escritórios das intempéries, permitindo sua abertura mesmo em dias de chuva forte e ventos frios.

A ventilação noturna natural da massa térmica do edifício, para redução da demanda de condicionamento artificial e das temperaturas internas altas durante o dia, é uma estratégia passiva e que dá bons resultados. Desvantagens, no entanto, são associadas ao seu uso: menor segurança patrimonial pela abertura das janelas em horários de desocupação e a exposição do interior do edifício à ação das intempéries, como chuvas ou ventos fortes. Neste estudo,

optou-se por utilizar desta estratégia tomando partido da proteção promovida pela adição da cavidade à fachada. Foi simulada a condição de ventilação noturna apenas para a cavidade, e nos períodos de maior calor, e o resultado foi uma significativa redução tanto nas horas de temperaturas acima da faixa de conforto como na demanda por resfriamento. A escolha do concreto para fechamento inferior e superior da cavidade, entre os pavimentos, promove um desempenho melhor do uso da ventilação noturna do que outros materiais, por apresentar alta massa térmica.

A melhor forma de reduzir a carga térmica representada pelos ganhos solares indesejados é evitar que a radiação solar entre nos ambientes, pelo posicionamento de dispositivos de sombreamento externos ao edifício. Para Curitiba, esta solução pode ser problemática, pela ocorrência significativa de períodos de muito frio, quando a ação de aquecimento proporcionada pelo sol é desejável. Os dispositivos de proteção externos usuais são representados por brises ou marquises, soluções mais caras e que demandam maior manutenção do que persianas ou cortinas, dispositivos internos. Os brises podem ser reguláveis, mas ainda assim configuram uma solução complexa e de alto custo. Na fachada dupla ventilada, é possível aliar as vantagens de ambos os tipos de proteção solar, já que a segunda pele protege o dispositivo das intempéries, permitindo que sejam utilizadas persianas ou cortinas para a proteção solar, de fácil manipulação pelos ocupantes, localizadas exteriormente aos ambientes que devem proteger.

A orientação solar das fachadas que receberão o tratamento com fachada dupla ventilada foi considerada como um forte limitante de projeto. Simulações com a variação deste parâmetro foram realizadas para os modelos A e B, e observou-se que a orientação norte ou sul são as mais recomendadas. A utilização da FDV para a orientação leste ou oeste devem ser evitadas, por aumentarem a necessidade de resfriamento do ambiente. A maior vantagem observada, no caso da orientação sul, é a pouca demanda por aquecimento em comparação com o mesmo modelo com fachada simples na mesma situação.

O estudo também explorou o desempenho térmico e energético dos modelos considerando o uso de vidros especiais. Fechamentos largamente envidraçados são usuais em edifícios comerciais, seja por uma decisão estética (desejo dos empreendedores aliado à tendência de uniformização da linguagem plástica dos projetos de arquitetura em escala mundial) ou por necessidade sanitária, já que as grandes profundidades usuais dos pavimentos

comerciais demandem uma maior área de vidro para manter as exigências mínimas de iluminação e ventilação naturais das legislações urbanísticas. A indústria tem investido em pesquisas e desenvolvimento de vidros especiais que diminuam o baixo desempenho térmico característico deste material, e assim melhorar as condições ambientais dos edifícios decorrentes do seu uso. A investigação do uso de vidros especiais nos modelos, conduzida pelo estudo, não identificaram vantagens significativas que justifiquem o seu uso em detrimento do vidro comum. Foram estudados o uso de vidro refletivo, vidro duplo e vidro seletivo de baixa emissividade, os quais, ao serem aplicados ao sistema, levaram à redução da demanda de condicionamento artificial. No entanto, este desempenho apresentou-se semelhante à FDV com vidro comum, com acréscimo de proteção solar e ventilação noturna da cavidade. A maior vantagem associa-se ao vidro refletivo, no entanto, este foi descartado por reduzir significativamente também a transmissão de luz visível para o interior do ambiente, levando provavelmente a um maior consumo de energia elétrica da iluminação artificial. Além do mais, estes vidros especiais levariam à elevação do custo financeiro de implantação do sistema de FDV.

Vários pontos favoráveis ao uso de fachadas duplas ventiladas foram identificados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, tanto pela revisão bibliográfica quanto pela análise dos resultados das simulações. No entanto, é preciso reconhecer que as FDV não são a única forma de melhorar o desempenho dos edifícios de escritórios em Curitiba através do tratamento de suas fachadas, e podem inclusive não representarem a solução mais adequada do que fechamentos com maior isolamento e maior proteção solar. Este aspecto não é o foco deste estudo, e foi pouco explorado pelas simulações. Por outro lado, o sistema de FDV apresenta uma potencial vantagem para a renovação arquitetônica de edifícios existentes, e que necessitam da estratégia de retrofitting de fachada seja para melhora do desempenho térmico e energético dos seus ambientes, seja pelo desejo de um *upgrade* estético. A instalação do sistema para o *retrofitting* da fachada existente pode ser executada sem que o edifício deixe de ser ocupado, já que a intervenção é externa aos ambiente e independente da estrutura existente. Da mesma forma, se for possível manter o fechamento existente, representa uma solução sustentável, por evitar a geração de entulhos oriundos da demolição e manter a construção existente, com melhora do desempenho atual.

A fachada dupla ventilada é uma solução de alto desempenho, porém de operação complexa e de alto custo de implantação. Estes dois aspectos representam os principais pontos

negativos, identificados pelo estudo, quanto ao uso de FDV em edifícios de escritórios. O alto custo de implantação de um sistema de FDV é inegável, já que é necessário que uma estrutura suplementar seja acoplada aos fechamentos internos para apoiar a segunda pele, e devem ser reforçados para tanto. O uso de vidro pela fachada é maior, já que a segunda pele representa a duplicação do fechamento do edifício. Os vidros utilizados, mesmo que sejam do tipo comum, são mais caros, pois devem apresentar uma resistência maior do que vidros simplesmente encaixilhados usualmente utilizados pelos fechamentos convencionais.

As fachadas convencionais configuram soluções mais robustas, no sentido de que o entendimento do ocupante sobre o seu funcionamento é mais fácil, assim como a interação com as esquadrias operáveis, manipulação da proteção solar e do sistema de condicionamento artificial é melhor compreendida. A complexidade de operação é um ponto negativo do uso de sistema. Para obter a melhora do desempenho térmico e energético do edifício com uso de FDV, foram utilizadas estratégias de controle de temperaturas que demandam sistemas automatizados no caso de sua implantação física. Os cenários explorados pelas simulações consideram que a abertura e o fechamento das esquadrias, para ventilação natural, sejam controlados pelas temperaturas internas. Nesta situação, o sistema deverá compreender termostatos, automatização das esquadrias operáveis e um sistema de controle central eletrônico. Outro ponto negativo a ser apontado é o aumento da área construída não utilizável do edifício. A cavidade da FDV representa um considerável aumento na área sem ocupação dos pavimentos (aproximadamente 6%).

Uma observação se faz necessária quanto ao tipo de FDV selecionada para a condução desta pesquisa. A cavidade contínua, que percorre ininterruptamente todos os pavimentos do edifício, é a mais estudada e a mais citada pelos artigos levantados pela revisão bibliográfica. No entanto, optou-se em não utilizá-la pelos seguintes motivos: tendência de superaquecimento da cavidade junto aos andares mais altos no verão, levando ao aumento do uso de condicionamento artificial e temperaturas internas menos agradáveis; geração de pontos de turbulência do fluxo do ar que circula na cavidade; transmissão de ruídos e poluição entre pavimentos, além do menor controle da propagação de chamas e fumaça no caso de um incêndio.

A tendência dos ambientes em edifícios com fachadas duplas ventiladas é serem mais quentes do que com fachadas convencionais. A fachada dupla proposta, por este estudo,

foi intensamente estudada para chegar a um resultado mais favorável também na redução de horas ocupadas com temperaturas altas, comparando com o fechamento simples. Por este motivo, entre outros, a seguir são apresentadas algumas recomendações para o projeto de FDV para edifícios de escritórios, em Curitiba.

- O desempenho dos ambientes com o uso de FDV depende, entre outros fatores já citados, da forma da planta, pé-direito, orientação solar, da área do pavimento do edifício. Assim, as conclusões numéricas deste estudo não podem ser generalizáveis para outros edifícios.
- A orientação recomendada para a implantação das FDV é a norte/ sul.
- O uso de proteção solar no interior da cavidade é indispensável.
- As cargas térmicas internas elevadas levam a um desempenho pior do sistema.
- É necessário o uso de rotinas e dispositivos para o controle automatizado das aberturas para ventilação, em especial as situadas na pele externa da cavidade, para garantir o bom desempenho do sistema. A automação da proteção solar também é recomendável.

8.4 Considerações finais

O uso do sistema de fachadas duplas ventiladas difundiu-se intensamente a partir dos anos 1990, analogamente à disseminação da arquitetura *eco-tech* e da crença que o desenvolvimento de novas tecnologias pode solucionar as questões de sustentabilidade ambiental dos edifícios. Renomados arquitetos do final do século XX e início do século XXI experimentaram, em seus projetos, diversas tipologias de fachadas duplas, contribuindo para o desenvolvimento contínuo do sistema e fornecendo campo para a discussão sobre sustentabilidade de edifícios comerciais e altos, nos centros urbanos. Muito ainda há para o completo entendimento do sistema e de seus benefícios, visto que muitos trabalhos científicos vêm sendo publicados, relatando os resultados de pesquisas de simulações computacionais, medições *in loco* e experimentos, demonstrando a atualidade do tema. Uma das principais questões que os pesquisadores se colocam, visto o relato de casos de sucesso do uso do sistema em países europeus como a Alemanha, e da sua interdependência com as condições climáticas, diz respeito às possibilidades de funcionamento em países de clima quente e úmido, como o Brasil.

O desejo por torres envidraçadas para edifícios é uma tendência de ampla disseminação mundial, no entanto, é consenso que esta tipologia apresenta baixo desempenho quanto à eficiência energética e manutenção de conforto interno. A escolha pelo sistema de fachadas duplas ventiladas, por alguns arquitetos, busca aliar este desejo com a responsabilidade ambiental para uma arquitetura verde. Esta tecnologia é um ponto de partida para o desenvolvimento de estratégias para integrar edifícios de escritórios ao âmbito da sustentabilidade em arquitetura, não como uma solução total mas sim como um componente do sistema global do projeto da edificação.

Enquanto que a eficiência energética pode não configurar a principal razão para a opção pelo sistema, já que existem outras formas de solucionar o envoltório dos edifícios com este mesmo objetivo, usando de maior isolamento e maior proteção solar, existem outros aspectos sociais e econômicos que podem ser explorados pela sua implantação em construções nos centros urbanos. A criação de um ambiente para o trabalho mais confortável e estimulante para os ocupantes é muito destacada na literatura, obtida pela melhora do conforto acústico das construções em locais ruidosos; da possibilidade da abertura de janelas em locais ventosos, reduzindo assim a ocorrência da síndrome *sick building*; do aumento do espaço usável dos pavimentos, por permitir a ocupação junto às janelas minimizando o desconforto por assimetria térmica e potencialização do uso da luz natural e manutenção das vistas do exterior. A arquitetura resultante, com membranas diáfanos com diferentes graduações de permeabilidade visual, se contrapõe à arquitetura comercial dominante de vidros escuros e reflexivos, pontos de interrogação urbanos que, ao solucionar os problemas de conforto ambiental internos, devolvem para o meio externo a incidência da radiação solar indesejada. Entretanto, quando se fala em sustentabilidade, talvez o maior potencial do uso do sistema resida na possibilidade de readequação e reabilitação urbana de edifícios existentes e obsoletos. Neste contexto, os ganhos para o desempenho energético e ambiental demonstram ser mais palpáveis e significantes.

8.5 Sugestões de trabalhos futuros

Sugerem-se os seguintes tópicos para desenvolvimentos de trabalhos futuros:

- Realização de um experimento, englobando a construção da fachada dupla proposta por este estudo, para monitoramento *in loco*.

- Investigação da eficiência do uso da iluminação natural nos ambientes com fachadas duplas ventiladas.
- Investigação global das condições de conforto nos ambientes com fachadas duplas ventiladas, incluindo a variável umidade.
- Análise do isolamento acústico proporcionado pelo uso da fachada dupla ventilada em um edifício.
- Verificação do potencial representado pela ventilação forçada que, se acarreta consumo de energia elétrica, proporciona razoável racionalidade na distribuição de fluxos de energia térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9077 – Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2003.

ANDREOTTI, Giulia. **From Single to Double-skin Façades**. University of Bath, 2003. Disponível em: www.bath.ac.uk/cwct/cladding_org/fdp/paper9.pdf Acesso em: 6.fev.2010

ARONS, D. (2000). Properties and Applications of Double-Skin Building. Facades. MSc thesis in Building Technology, Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA. Disponível em: <http://libraries.mit.edu/docs>. Acesso em: 3.abril.2010

BELGIAN BUILDING RESEARCH INSTITUTE - BBRI. **Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active façades**. Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute, 2002. Version n° 1. Disponível em: <http://www.bbri.be/activefaçades/index2.htm>

____. Ventilated double façades: **Classification and illustrations of façade concepts**. Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute, 2004

BLOMSTERBERG, Åke. **Best Practice for Double Skin Façades – WP5 Best Practice Guidelines**. Energy and Building Design, University of Lund, 2007

BRAHAM, William W. **Active glass Walls: A Typological and Historical Account**. AIA Convention, Las Vegas, 2005. Disponível em: http://works.bepress.com/william_braham/2/ . Acesso em: 6.fev.2010

BRASIL. LEI No 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm. Acesso em: 7 nov. 2008.

BRASIL. Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Ministério de Minas e Energia, PROCEL Edifica e LABeee, 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm. Acesso em: 7 nov. 2008.

BRASIL-a. Apresentação programa PROCEL. Disponível em: http://www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_Procel/default.asp. Acesso em: 7 nov. 2008.

BRASIL-b. *Ministério das Minas e Energia*. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL-a. Regulamento de avaliação da conformidade do nível de eficiência energética para edifícios comerciais, de serviços e públicos. Ministério de Minas e Energia, PROCEL Edifica, 2009.

BRASIL-b. Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Energia. Resenha energética brasileira. Brasília, 2009.

BRASIL-c. Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Energia. Manual para aplicação do regulamento: RTQ-C. Ministério de Minas e Energia, PROCEL Edifica, 2009.

CARMO, Adriano T. e PRADO, Racine. **Qualidade do ar interno.** São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1999. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/racine-iaq.pdf>. Acesso em: 7 de nov. 2008.

CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CASTELNOU, A. M. N. **Por uma arquitetura ecológica.** In: REVISTA TERRA & CULTURA - Cadernos Científicos de Ensino e Pesquisa. Londrina PR: Centro Universitário Filadélfia - Unifil, ano XVIII, n. 35, jul./dez.2002. p.18-24.

CHAN, A.L.S.; CHOW, T.T.; FONG, K.F.; LIN, Z. **Investigation on energy performance of double skin facade in Hong Kong.** Energy and Buildings, 2009.

CIANCIARDI, Glaucus; BRUNA, Gilda Collet. **Procedimentos de sustentabilidade ecológicos na restauração dos edifícios citadinos.** Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo. Disponível em: www.mackenzie.br/dhtm/seer/index.php/cpgau/article/.../143/48. 2004

COMPAGNO, Andrea. **Intelligent Glass Façades.** Birkhäuser Basel, 2002. 183 p.

CRESPO, A.M.L. **History of the Double Skin Façades.**

Disponível em: <http://envelopes.cdi.harvard.edu/envelopes/content/resources/PDF/doubleskins.pdf>

DOEBBER, Ian; MCCLINTOCK, Maurya. **Analysis process for designing double skin facades and associated case study.** Arup, San Francisco, CA. 2006. Disponível em: simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/SB06/doebber.pdf. Acesso em: 16 de junho de 2010.

EMMERICH, Steven J.; DOLS, W. Stuart; AXLEY, James W. **Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools.** National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce, 2001. Disponível em: (<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01073.pdf>) Acesso em: 28 set. 2008.

ENERGYPLUS versão 5.0. Programa de simulação computacional. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Acesso em: 07 jul.2010.

GAN, G. (2001). Thermal transmittance of multiple glazing: computational fluid dynamics prediction. Applied Thermal Engineering. 21 (2001) 1583-1592.

GAN, G. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. **Energy and Buildings** 38, p. 410–420. 2006.

GELINSKI, Gilmar. Edifícios de uso múltiplo. **Finestra**, São Paulo, Arco Editorial, dezembro de 2005. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/arquitetura645.asp>. Acesso em: 10 set. 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1995. Disponível em: www.das.ufsc.br/~andrer/ref/bibliogr/pesq/pesq1.htm Acesso em: 27 set. 2008.

GIVONI, B. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines**. Rev. Energy and Buildings: v. 18, n. 1, p. 11-23, Lausanne. 1992.

GOULART, S; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Florianópolis : Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 345.

GRATIA e HERDE, D.-a. Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin façade? **Building and Environment** 39, p. 399 – 409. 2004.

____-b. Natural ventilation in a double-skin façade. **Energy and Buildings** 36, p. 137–146. 2004.

____-c. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade. **Energy and Buildings** 36, p. 1139–1152. 2004.

____. Greenhouse effect in double-skin façade. **Energy and Buildings** 39 (2007) 199–211. 2006.

____-a. Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin façade. Elsevier, **Solar Energy** 81, p. 435–448, 2007.

Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V50-4M0S21G&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=fbfea39e5c7b6b3d83386c92ad239b3b. Acesso em: 24 set. 2008.

____-d. The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. **Energy and Buildings** 39, p. 364–373, 2007.

HARRISON, K.; MEYER-BOAKE, T. **The Tectonics of the Environmental Skin**. University of Waterloo, School of Architecture, 2003.

Disponível em: http://www.fes.uwaterloo.ca/architecture/faculty_projects/terri/ds/double.pdf. Acesso em: 6.fev.2010

HENSEN, J.L.M. Integrated Building and airflow Simulation: an overview. **Proceedings from the Ninth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering**, Taipei, Taiwan, 2002.

Disponível em: http://www.bwk.tue.nl/fago/hensen/publications/02_icccbe_airflow.pdf

HENSEN, J.L.M., BARTAK, M., DRKAL, F. Modeling and simulation of double-skin facade systems. **ASHRAE Transactions**, vol. 108:2, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2002.

Disponível em: http://www.bwk.tue.nl/fago/hensen/publications/02_ashrae_dskin.pdf

KUKREJA, C. P. **Tropical architecture**. McGraw-Hill, Nova Deli, 1978.

JAGER, W.. **Double Skin Facades – Sustainable Concepts**. Presentation of Hydro for Syd Bygg 2003, Malmo, Sweden. 2003.

LABEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **AnalysisBio**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, CENTRO TECNOLÓGICO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Florianópolis, 2009.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L. ; PEREIRA, F. Eficiência energética na arquitetura. 2ª Edição. São Paulo: ProLivros, 2004. 192 p.

LANG, Werner; HERZOG, Thomas. **Using multiple glass skins to clad buildings**. Architectural Record, McGraw-Hill Companies, julho de 2000. Disponível em: <http://archrecord.construction.com/features/green/archives/0007edit-2.asp>. Acesso em: 25 fev. 2010.

LEE, E.; SELKOWITZ, S.; BAZJANAC, V.; INKAROJRIT, V. *et al* . **High-Performance Commercial Building Façades**. Building Technologies Program, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), University of California, Berkeley, USA, 2002. Disponível em: <http://gaia.lbl.gov/hpbf/documents/LBNL50502.pdf> Acesso em: 12.out.2009.

LI, Shang-Shiou. **A Protocol to Determine the Performance of South Facing Double Glass Façade System**. Msc Thesis in Architecture, submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2001.

Disponível em: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04212001-152253/unrestricted>. Acesso em: 5 de nov. 2008.

LIDDAMENT, M. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. Bracknell, Berkshire. 1986.

MANZ, H; FRANK, T. Thermal simulation of buildings with double-skin façades. **Energy and Buildings** 37, p. 1114–1121. 2005.

MARCONDES, Monica Fernades. **Double skin façades em high-rise office buildings in São Paulo - A possible environmental efficient solution?** Grantee from the European Union Programm Of High Level Scholarships For Latin Amenca, ALBAN, Portugal. **MA Dissertation** - Environment & Energy Studies Programme, Architectural Association Graduate School (AA), London, 2004. Disponível em: http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/trabalhos_recentes/monica_marcondes.pdf

MARCONDES, Mônica Pereira. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP. São Paulo, 2010. 244 p.:iL.

MELET, Ed. **Sustainable Architecture Towards a Diverse Built Environment**. Rotterdam: NAI Publishers, 1999.

MELO, A.P.; LAMBERTS, R.; VERSAGE, R; SORGATO, M. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, CENTRO TECNOLÓGICO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, agosto de 2008.

MELO, A.P.; BARCELOS, M. M. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus versão 5.0**. Florianópolis, julho de 2010.

MEYER-BOAKE, T. **The Tectonics of the Double Skin: Green Building or Just more Hi-Tech Hi-Jinx?** University of Waterloo, School of Architecture, 2003. Disponível em: http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/ds/tectcase.pdf. Acesso em: 6.fev.2010

_____. **Building an environmental ethic**. University of Waterloo, School of Architecture, [ca. 2009]. Disponível em: http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/crsnotes.html. Acesso em: 24.fev.2010

NAKAMURA, Juliana. Especial PINI 60 anos – Fachada cortina. **Revista AU**, Pini, 2008. Disponível em: <http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/166/artigo70733-1.asp>. Acesso em: 10 set. 2008.

OESTERLE, E.; LIEB, R-D.; LUTZ, M.; HEUSLER, W.. **Double Skin Facades – Integrated Planning**. Prestel Verlag: Munich, Germany, 2001.

ORDENES, M; PEDRINI, A. GHISI, E; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VISUALDOE-3.1**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, CENTRO TECNOLÓGICO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC). Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Florianópolis, setembro de 2003.

PASQUAY, Till. Natural ventilation in high-rise buildings with double façades, saving or waste of energy. **Energy and Buildings**, 2006.

Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2V-4BT1TC3-1&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=63b2cde7922ab0ce18435151b295798f. Acesso em: 24 de out. 2008.

PÉREZ-LOMBARD, L; ORTIZA, J.; POUT, C. **A review on buildings energy consumption information**. Energy and Buildings (2007), doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007

PIRRÓ, L. F. S.; ROMÉRO, M. A. **Office buildings façades: the relationship between costs and performance**. PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Suíça, Setembro 2006.

Disponível em: http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol2/PLEA2006_PAPER245.pdf. Acesso em: 8 dez.2009.

POIRAZIS, Harris. **Double Skin Façades for office building**. Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004. Disponível em: http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Bok-EBD-R3-G5_alt_2_Harris.pdf. Acesso em: 21 de out. 2008.

_____. **Double Skin Façades: A Literature Review**. Department of Architecture and Built Environment, Division of Energy and Building Design. Lund University, Lund Institute of Technology, Lund 2006.

RENZO PIANO BUILDING WORKSHOP. Disponível em: <http://rpbw.r.ui-pro.com/> Acesso em: 26.fev.2010.

REY, Emmanuel. Office building retrofitting strategies. **Energy and Buildings** 36 (2004) 367–372

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Produção, 2000.

ROBSON, C., **Real World Research**. 2.ed. Oxford, Blackwell Publishing, 2002.

SAELENS, D. . **Energy Performance Assessments of Single Storey Multiple-Skin Façades**. PhD thesis, Laboratory for Building Physics, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium. 2002. Disponível em: http://envelopes.cdi.harvard.edu/envelopes/content/resources/pdf/case_studies/PhD_Dirk_Saelens.pdf

SAELENS, Dirk, CARMELIET, Jan e HENS, Hugo. Energy Performance Assessment of Multiple Skin Facades. **International Journal of HVAC&R Research**, Vol. 9, pp.167-186. 2003.

SILVA, J.; PAIVA, C. Fachadas duplas ventiladas. **FINESTRA**, Edição 54. Setembro de 2008. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/ruy-rezende-edificio-cidade-11-12-2008.html>. Acesso em: 16.junho.2010.

STEC, W., VAN PAASSEN, A.H.C. Defining the Performance of the Double Skin Facade with the Use of the Simulation Model. **Proceedings of Building Simulation**, 2003, 1243-1250, Netherlands.

STREICHER, Wolfgang (Ed.). **Best Practice for Double Skin Façades - Report State of the art**. Institut of Thermal Engineering, Graz University of Technology, 2005. Disponível em: <http://www.bestfacade.com/pdf/downloads/WP5%20Best%20practice%20guidelines%20report%20v17final.pdf> Acesso em: 6.fev.2010

SUNGUARD – MANUAL TÉCNICO. Disponível em: <http://www.sa.pt.sunguardglass.com/SpecificationsResources/TechnicalLibrary/index.htm>.

SAYEGH, Simone. Alto desempenho, baixo impacto. **Téchne**, São Paulo, Editora Pini, abril de 2008. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/133/artigo77952-1.asp> Acesso em: 11 nov. 2009.

TAYLOR, P.; FULLER, R.J.; LUTHER, M.B. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. **Energy and Buildings** 40, p. 793–800. 2008.

TODOROVIC, B., & MARIC, B. **The influence of double façades on building heat losses and cooling loads**. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade University, Belgrade, Yugoslavia, 2001

TODOROVIC, B. **Building's imitation of a human body's thermal behavior**. International Conference “Passive and Low Energy Cooling 447 for the Built Environment”, May 2005, Santorini, Greece. Disponível em: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5Cpalenc%5C2005%5CTodorovic2.pdf.

TORRES, M. *et al.* Double skin façades – Cavity and exterior openings dimensions for saving energy on Mediterranean climate. **Building Simulation**, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Normas para apresentação de documentos científicos: Teses, dissertações, monografias e outros trabalhos acadêmicos**. Curitiba: Ed. UFPR, 2007.

UUTU, S. **Study of Current Structures in Double-Skin Facades**. MSc thesis in Structural Engineering and Building Physics, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Finland. 2001.
Disponível em: <http://www.hut.fi/Units/Civil/Steel/SINI2.PDF>

WONG, P. C. **Natural Ventilation in Double-Skin Façade Design for Office Buildings in Hot and Humid Climate**. The University of New South Wales Australia : s.n., 2008.

YELLAMRAJU, V. **Evaluation and design of double-skin facades for office buildings in hot climates**. Thesis – Master of science. Texas A&M University. 2004.

YIN, Robert K. **Estudo de caso – Planejamento e métodos**. Trad. Daniel Grassi. 3. ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 212 p.

YOSHIDA, Nobuyuki, ed. Cultural Centre Jean Marie Tjibaou: Renzo Piano Building Workshop. Architecture and Urbanism, 1998

8.6 Bibliografia complementar

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING. ASHRAE 55-2004: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2004.

EDWARDS, Brian. **O guia básico para a sustentabilidade**. Barcelona: Gustavo Gili, 2005. 226 p.

MAZZAROTTO, A. C. K.; SCHMID, A. L.; TAVARES, S. F. **Influência do desempenho térmico das fachadas nas emissões de CO₂, na fase operacional, em edifícios de escritórios em Curitiba.** ENTAC, 2010.

MEI, L., INFIELD, D., EICKER, U., FUX, V. (2003). Thermal Modeling of a Building with an Integrated Ventilated PV Façade. **Energy and Buildings** 35, p. 605-617. 2003.

SCHMID, A.L. **Análise numérica de transferência de calor e circulação de ar num edifício solar.** Dissertação de mestrado Kogaku Shushi. Universidade de Utsunomiya, Japão, 1993.

SCHMID, A.L. **A idéia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído.** Curitiba: Pacto Ambiental, 2005. 338 p.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F; LAMBERTS, R. . **CO₂ embutido em edificações residenciais brasileiras.** ENTAC, 2008.

YEANG, Ken. **Proyectar com la naturaleza.** Rubí, Barcelona: Editora Gustavo Gili S.A., 1999. 198 p.

WESTPHAL, F. S. LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. In: Ninth International IBPSA Conference, **Building Simulation 2005, Proceedings.** Montreal: IBPSA, 2005. pp 1331-1338

WONG, P. C.; PRASAD, D.; BEHNIA, M. A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate. **Energy and Buildings**, 2006.

APÊNDICES

Detalhamento dos componentes das aberturas no *EnergyPlus*

A ventilação natural no EnergyPlus é dada em função da configuração das aberturas (janelas e portas) no programa e do regime dos ventos anual que agem sobre o modelo.

Este objeto especifica as propriedades da ventilação natural através das portas e janelas quando estes estão fechados ou abertos. Isto inclui os coeficientes de fluxo de massa do ar quando a abertura está fechada (isto é, a infiltração), as frações de abertura de cada esquadria (totalmente fechada, parcialmente aberta ou totalmente aberta), coeficientes de descarga quando abertas, entre outros. As especificações de cada parâmetro de entrada relacionado com este objeto são apresentadas a seguir.

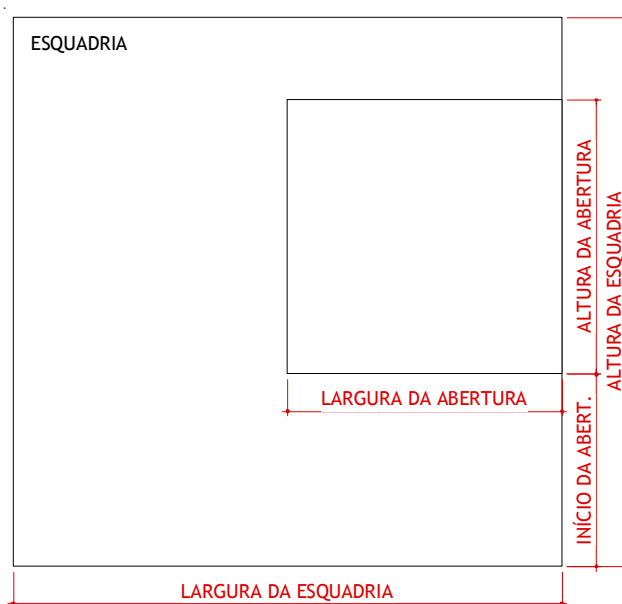
- Denominação do tipo de abertura: neste campo, são definidos os tipos de aberturas relacionadas às esquadrias do modelo. Nas simulações, foram utilizados três tipos, a saber: janela, porta e abertura da fachada dupla ventilada.
- Coeficiente de fluxo de massa de ar quando a abertura está fechada: este parâmetro está relacionado com as frestas através das esquadrias quando estes elementos estiverem fechados. O programa cria automaticamente quatro frestas em volta do perímetro da porta ou da janela, e o valor do coeficiente deve ser inserido. Os dados para este coeficiente de infiltração foram sistematizados por Liddament (1996) e adaptados para uso no *Energy plus* por Melo *et al.* (2008).

Para cada tipo de abertura utilizou-se os seguintes valores de infiltração (MELO *et al.*, 2008):

- Janela - uma folha com deslizamento horizontal: 0,0001 kg/s.m.
- Porta – uma folha pivotante interna: 0,0024 kg/s.m.
- Abertura FDV – uma folha pivotante horizontal: 0,00041 kg/s.m.
- Expoente de fluxo de massa de ar quando a abertura está fechada: este parâmetro também se relaciona com as frestas das esquadrias. O valor inserido é utilizado com expoente na equação de ventilação das frestas. Segundo Liddament (1996), para portas e janelas, o valor a ser inserido é 0,66.
- Número de frações de abertura: este parâmetro define a quantidade de frações de aberturas que as esquadrias possuem. O valor do primeiro fator de abertura deve ser 0, referente à mínima fração de abertura considerada para a janela ou porta e o último

valor para o fator de abertura deve ser 1. No caso de haver três níveis de abertura para uma janela, o primeiro fator de abertura deve ser 0 (mínima fração de abertura), o segundo 0.5 (para uma fração de abertura intermediária) e o último 1 (máxima fração de abertura) (MELO, *et al.*, 2008).

Nas simulações, as janelas têm três variações de fração de abertura, enquanto os demais componentes têm dois. Estas frações são dadas pelas relações entre as dimensões totais das esquadrias e as dimensões da abertura efetiva para ventilação, de acordo com a figura a seguir.



$$\text{FATOR LARGURA} = \text{LARGURA ABERTURA} / \text{LARGURA ESQUADRIA}$$

$$\text{FATOR ALTURA} = \text{ALTURA ABERTURA} / \text{ALTURA ESQUADRIA}$$

$$\text{FATOR INÍCIO DA ALTURA} = \text{INÍCIO ABERTURA} / \text{ALTURA ESQUADRIA}$$

Figura 00.1 - Frações de aberturas das esquadrias.

- Fator de abertura: representa o fator de abertura da esquadria. O valor inicial deve ser 0, sendo que os próximos valores podem variar até o valor 1. Este fator de abertura pode variar até quatro vezes, para representar o quanto a esquadria permite a ventilação natural.
- Coeficiente de descarga do fator de abertura: corresponde à fração eficaz da ventilação natural das esquadrias com relação ao fator de abertura. O valor a ser inserido pode variar de 0.0 a 1.0.
- Fator de largura para o fator de abertura: é a razão da largura da abertura pela largura da esquadria. O valor pode variar de 0.0 a 1.0.

- Fator de altura para o fator de abertura: é a razão da altura da abertura pela altura da esquadria. O valor pode variar de 0.0 a 1.0.
- Fator de início da altura para o fator de abertura: corresponde à razão da altura do piso até a parte inferior da janela pela altura da janela ou da porta. O valor pode variar de 0.0 a 1.0.

Modelo B: edifício sede do Instituto de Engenharia do Paraná

A seguir são apresentados os desenhos de arquitetura originais do edifício.

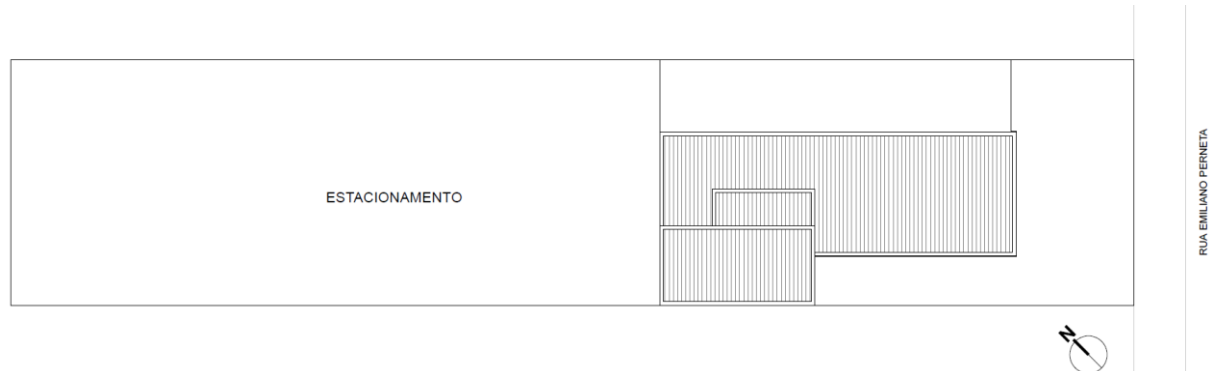


Figura 0.2 - Implantação do edifício.

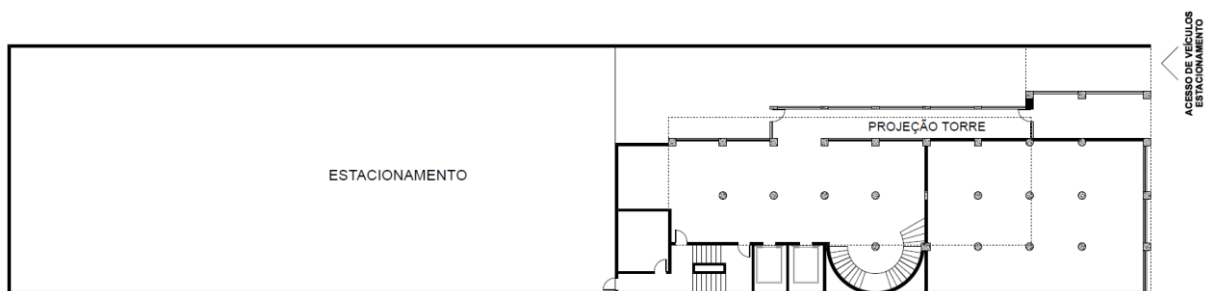


Figura 0.3 - Pavimento térreo.

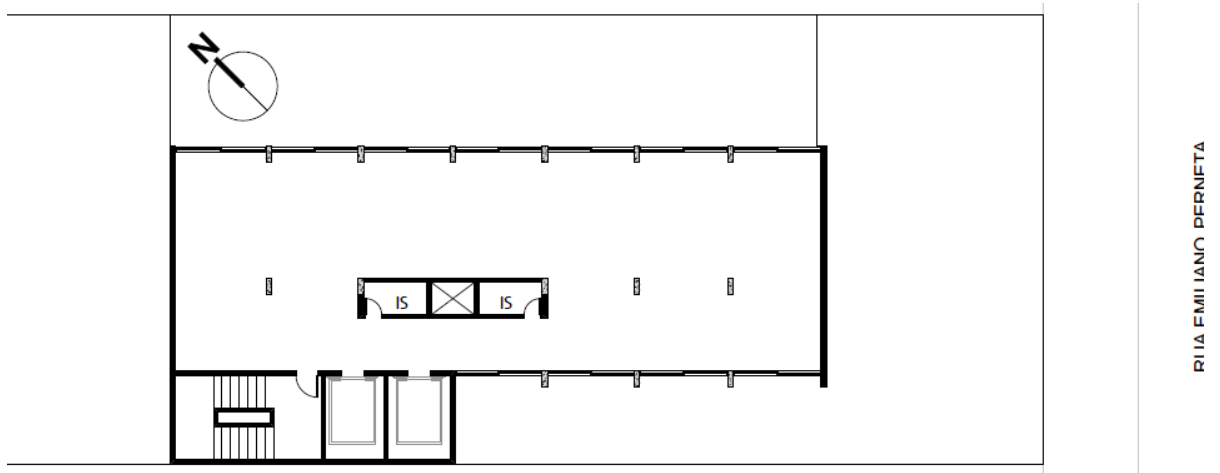


Figura 0.4 - Pavimento tipo.

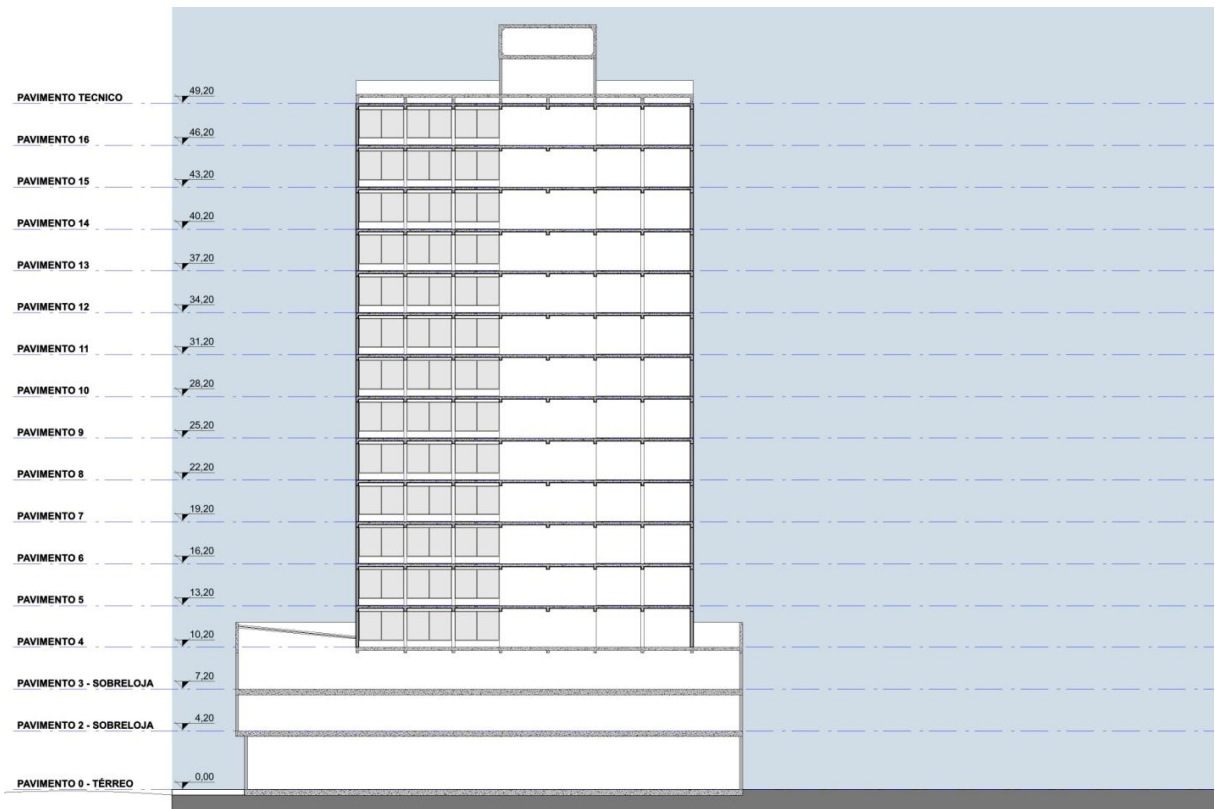


Figura 0.5 - Corte longitudinal do edifício.



Figura 0.6 - Fachada sudoeste.